

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

SOUČASNÝ STAV TĚŽBY A ZÁSOB URANU
THE CURRENT STATE OF MINING AND URANIUM RESERVES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK VONDRA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LADISLAV ŠNAJDÁREK

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Marek Vondra

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Současný stav těžby a zásob uranu

v anglickém jazyce:

The current state of mining and uranium reserves

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popsat současný stav zásob uranu v ČR a ve světě, s ohledem na aktuální těžbu v ČR, ekologické zátěže a moderní metody těžby a sanace. Výhled možnosti využití uranu v moderních technologiích

Cíle bakalářské práce:

- 1) Shrnutí historického vývoje těžby uranu v ČR
- 2) Stručně popsat jednotlivé typy těžby uranu
- 3) Zhodnotit těžitelné světové zásoby uranu vzhledem k náročnosti dobývání
- 4) Sanační metody po těžbě uranu v ČR
- 5) Rešerše plánovaných technologií využívající uran jako palivo

Seznam odborné literatury:

PAULIŠ P., KOPECKÝ S., ČERNÝ P., Uranové minerály České republiky a jejich naleziště /Uranmineralien der Tschechische Republik und ihre Fundstelle, Vyd. 1.. Kutná Hora 2007. 2 sv. ISBN: 978-80-86406-45-9

LEPKA F., Český uran 1945-2002 : neznámé hospodářské a politické souvislosti, Vyd. 1., Liberec , Knihy 555, 2003, 101 s., ISBN: 80-86660-05-2

Horní právo. I. aII. díl, Stanoviska k zákonu č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství

Firemní literatura DIAMO státní podnik Střáž pod Ralskem

Materiály zveřejněné na:

<http://www.cbusts.cz/>

<http://world-nuclear.org/>

<http://www.mpo.cz/>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Šnajdárek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.10.2011

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, dr. h. c., CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá současným stavem těžby uranu. Popisuje vývoj těžby uranu na území ČR od počátků až po současný stav těžby. Dále jsou zde shrnuty nynější světové zásoby uranu, včetně uvedení nejvýznamnějších těžebních oblastí. Je popsán způsob zpracování rudy, jeho dopad na životní prostředí a sanace oblasti zasažené těžbou. V poslední části jsou uvedeny možné způsoby využití uranu v budoucnu.

Abstract

This bachelor thesis is engaged in current state of uranium mining. It describes development of uranium mining on the area of the Czech Republic from the beginning to current state of mining. There are summarized current uranium reserves in the world, with the most important mining areas included. The treatment of uranium ore is described, with its influence on the environment and the remediation of affected mining area. In the last section, the possible ways of uranium usage in the future are mentioned.

Klíčová slova

uran, těžba uranu, loužení in situ, sanace ložiska, zásoby uranu

Key words

uranium, uranium mining, in situ leaching, remediation of deposit, uranium reserves

Bibliografická citace

VONDRA, M. *Současný stav těžby a zásob uranu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Šnajdárek.

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: *Současný stav těžby a zásob uranu* zpracoval sám. Veškeré prameny a zdroje informací, které jsem použil k sepsání této práce, jsou uvedeny v seznamu použitých pramenů a literatury.

V Brně dne 14.5.2012

Marek Vondra

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Ladislavu Šnajdárkovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mým rodičům nejen za podporu při studiu.

Obsah

Abstrakt.....	5
Prohlášení autora.....	8
Poděkování.....	9
Obsah	10
1 Úvod.....	12
2 Vývoj a současný stav těžby uranu.....	13
2.1 Uran	13
2.2 Využití uranu	14
2.3 Historie těžby na území ČR.....	14
2.4 Současný stav těžby.....	16
2.5 Vznik a vývoj uranových podniků	16
2.6 Uranové minerály	17
2.7 Uranová ložiska na území ČR	18
3 Těžba uranové rudy	21
3.1 Způsob těžby	21
3.2 Těžba chemickým loužením in situ.....	21
3.3 Metody hlubinného dobývání.....	22
3.4 Právní předpisy	23
3.5 Používané technologie úpravy uranových rud	23
3.5.1 Příprava rudy pro loužení.....	24
3.5.2 Vyluhování uranu.....	24
3.5.3 Separace uranu z výluhů na měničích iontů.....	24
3.5.4 Získávání chemických koncentrátů.....	25
3.6 Obohacování uranu.....	25
4 Těžitelné světové zásoby uranu	26
4.1 Dělení ložiskových typů.....	26
4.2 Světové zásoby uranu	26
4.3 Světová produkce a potřeba uranu	27
4.4 Druhy těžby	28
4.5 Australská těžba	29
4.6 Kazašská těžba	30
4.7 Nigerská těžba	31
4.8 Mořské zásoby uranu.....	32
5 Dopady těžby uranu na životní prostředí.....	33
5.1 Zdroje zatížení životního prostředí těžbou uranu.....	33
5.2 Dopady v ČR	34
5.2.1 Uranové doly Příbram.....	34
5.2.2 CHÚ uranu MAPE Mydlovary	34
5.3 Sanace ložiska Stráž	35
5.3.1 Odpařování.....	35
5.3.2 Elektrodialýza	36
5.4 Jednotlivé etapy sanace ložiska Stráž.....	37
5.5 Nakládání s odpady v ČR.....	38
5.6 Dopady v Austrálii	39
5.7 Australské plány	39

6	Využití uranu v budoucnu.....	40
6.1	Urychlovačem řízený transmutor	40
6.2	Reaktory IV. generace	41
6.2.1	Reaktory s velmi vysokou teplotou (VHTR)	41
6.2.2	Reaktory využívající vodu v superkritické fázi (SCWR)	41
6.2.3	Reaktory založené na roztavených solích (MSR)	42
6.2.4	Rychlé reaktory chlazené plynem (GFR).....	42
6.2.5	Sodíkem chlazené rychlé reaktory (SFR)	42
6.2.6	Olovem chlazené rychlé reaktory (LFR)	43
7	Závěr	44
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	45
	Seznam použité literatury	46
	Seznam obrázků.....	49
	Seznam tabulek.....	49
	Seznam grafů	49

1. Úvod

Tato práce se zabývá současným stavem těžby a zásob uranu. Je patrné, že s tím, jak se rozvíjí jaderná energetika, se každým rokem také zvyšuje poptávka po uranu. Důležitou roli hraje pochopitelně politická situace a vývoj cen na trhu. Velké těžební společnosti jsou si toho velmi dobře vědomi, a proto soustředí těžbu do oblastí, kde je ekonomicky nejvýhodnější. Jedním z důsledků je rozmach těžby v rozvojových zemích.

A právě to je cíl mé práce. Popsat současnou domácí i světovou těžbu, uvést nejdůležitější těžební ložiska a nejčastější způsoby těžby. Podrobněji bych obsah mé práce shrnul do pěti oblastí, které na sebe navazují a nepochybně spolu také velmi úzce souvisí.

V první části jsem se zaměřil především na vývoj uranového hornictví v ČR, a to od úplných počátků těžby až po její současný stav. Jsou zde popsány jednak vznik a vývoj uranových podniků a jednak nejznámější česká uranová ložiska. S ohledem na světovou těžbu je zde popsán současný stav australské a kazašské těžby, jejíž zastoupení ve světě, hraje v tomto ohledu momentálně největší roli.

Druhá část popisuje způsob těžby a úpravy uranových rud. V otázce těžby jsem se zaměřil především na dva druhy těžby, které jsou podle mého názoru ty nejdůležitější. Především se jedná o těžbu loužením in situ, jejíž důležitost z hlediska těžby je dnes jednoznačně na prvním místě. Dále jsem se pokusil objasnit proces zpracování uranu, který je nedílnou součástí vzniku uranového koncentráту.

V další části jsem shrnul stav světových zásob a produkce uranu v protikladu s jeho potřebou v současné době. Všechny údaje jsem se pokusil aktualizovat podle nejnovějších informací, ovšem z hlediska toho, že se jedná mnohdy o těžko dostupné informace, nebylo možné všechny tyto údaje úplně aktualizovat.

S těžbou pochopitelně souvisí jeho dopad na životní prostředí. V další části jsem se tedy zaměřil především na dopady na životní prostředí v ČR a jejich řešení. Pro tento účel jsem zvolil sanaci ložiska Stráž. Vzhledem k obsáhlosti a složitosti celého procesu jsem popis procesu sanace zjednodušil a spíše jsem se pokusil vybrat to nejdůležitější. Dále jsem pro znázornění uvedl rozdíl v nakládání s jaderným odpadem v ČR a v Austrálii.

V poslední části mé práce jsem měl za úkol nastítnit možné využití uranu v budoucnu. Vzhledem k základním znalostem o dané problematice jsem se spíše pokusil vybrat několik, podle mého soudu možných variant využití uranu v budoucnu, a tyto popsat.

2. Vývoj a současný stav těžby uranu

2.1 Uran

Uran objevil M. H. Klaproth 24. září 1789 a pojmenoval ho podle planety Uranu. Ve skutečnosti však pracoval pouze s kysličníky uranu z jáchymovského smolince. Kovový uran byl získán až v roce 1841 redukcí tetachloridu uranu draslíkem a připravil ho B. Peliglot. Do roku 1898 pak bylo popsáno celkem 20 uranových nerostů, z toho 15 z Krušných hor, pět z nich bylo z Jáchymova. Uran je v zemské kůře poměrně rozšířeným prvkem, zemská kůra ho obsahuje $2-4 \cdot 10^{-4} \%$, což znamená, že v jedné tuně jsou 2–4g uranu (zahrnuje i oceány a moře) [8].

Momentálně se vyvíjí několik metod, jak získat uran z oceánů, přičemž všechny vyžadují velké množství mořské vody. Jednak jsou to metody využívající adsorpci uranylového iontu skrz vazby na chemický ligand („atom, molekula nebo iont koordinovaný kolem centrálního atomu komplexu“) [28], tyto metody již byly testovány a jsou momentálně považovány za nejvíce slibné, dalším možným způsobem získávání uranu v budoucnu je za použití biologických bakterií nebo řas [3].

V periodické soustavě je uran 92. prvkem a je čtvrtým v řadě aktinidů. Uran dlouho patřil k vzácným a drahým kovům. Jeho specifická váha je $19,05 \text{ g.cm}^{-3}$ a atomová hmotnost je 238,03 amu. V chemicky čisté podobě je uran stříbřitě bílý, kovově lesklý kov s modrým nádechem. V přírodě můžeme nalézt celkem tři izotopy uranu, označované jako Ac U (U_{235}), dále U I (U_{238}) a U II (U_{234}). Největší podíl mezi izotopy má U I (U_{238}), celkem 99,28 atomových procent, je tedy jednoznačně nejrozšířenějším izotopem uranu v přírodě. Typickou vlastností těchto izotopů je radioaktivita – neustálý děj rozpadání jeho atomových jader [8].



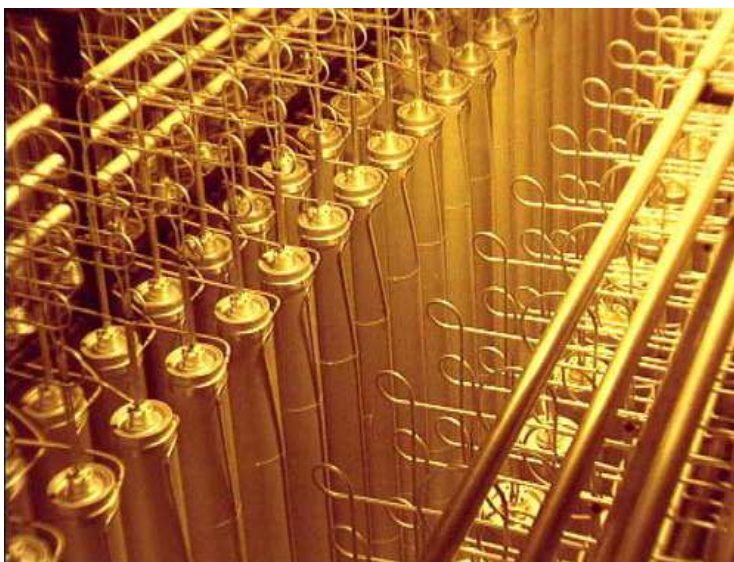
Obr. 1: Uraninit v kalcitové žilné výplni [1].

2.2 Využití uranu

Chceme-li přírodní uran využít v průmyslové energetice, je třeba jej nejprve obohatit, což znamená zvýšit obsah U_{238} . Míra obohacení uranu závisí na jeho použití, jako palivo do většiny jaderných reaktorů se obohacuje na tři až pět procent, v případě jaderných zbraní je třeba uran obohacený přes 90 %. Používá se i uran ochuzený, tzn. se sníženým obsahem U_{235} (stínění, vyvažování), většinou pod 0,3 % zbylý z předchozího procesu obohacování [14].

Uran se začal využívat zhruba před 150 lety, kdy se malé množství sloučenin uranu používalo na výrobu barev pro sklářství. Později v první polovině 20. století se uranová ruda dobývala jako zdroj radia. Velký zájem byl pak pro vojenské účely v první polovině 20. století, kterou v pozdních šedesátých letech nahradila spotřeba pro energetiku. Malé množství uranu se používá také v keramice [14].

Nyní se uran využívá především v energetických jaderných reaktorech, nebo v ponorkách jako palivo nukleárního pohonu. Ochuzený uran se používá díky své vysoké měrné hmotnosti při výrobě speciální protipancéřové munice ke zvýšení jejich průraznosti. Velké množství uranu je stále ještě deponováno (ukládáno) [29] ve formě náloží jaderných zbraní [14].



Obr. 2: Úložiště odstředivek v Evropě [4].

2.3 Historie těžby na území ČR

Členění rozvoje čs. uranového hornictví se v odborné publicistice ustálilo na čtyři období:

První období se datuje od roku 1946 do počátku 50. let. V tomto období se v Jáchymově kromě těžby na stávajících třech důlních závodech radiometricky ověřovaly rudné oblasti starých hornických prací a odvalů, kde se o uranovém zrudnění vědělo již z minulosti. Zároveň probíhala v jiných hornických revírech studie hornických archivů a mineralogických muzejních sbírek [1].

Druhé období v letech padesátých až do počátku let šedesátých lze charakterizovat dalším rychlým rozvojem průzkumných a těžebních prací.

Důležitý byl rozvoj vyhledávacích metod v oblasti Zadního Chodova a Dolní Rožínky, který vedl k nálezům a rychlému osvojení nových ložisek [1].

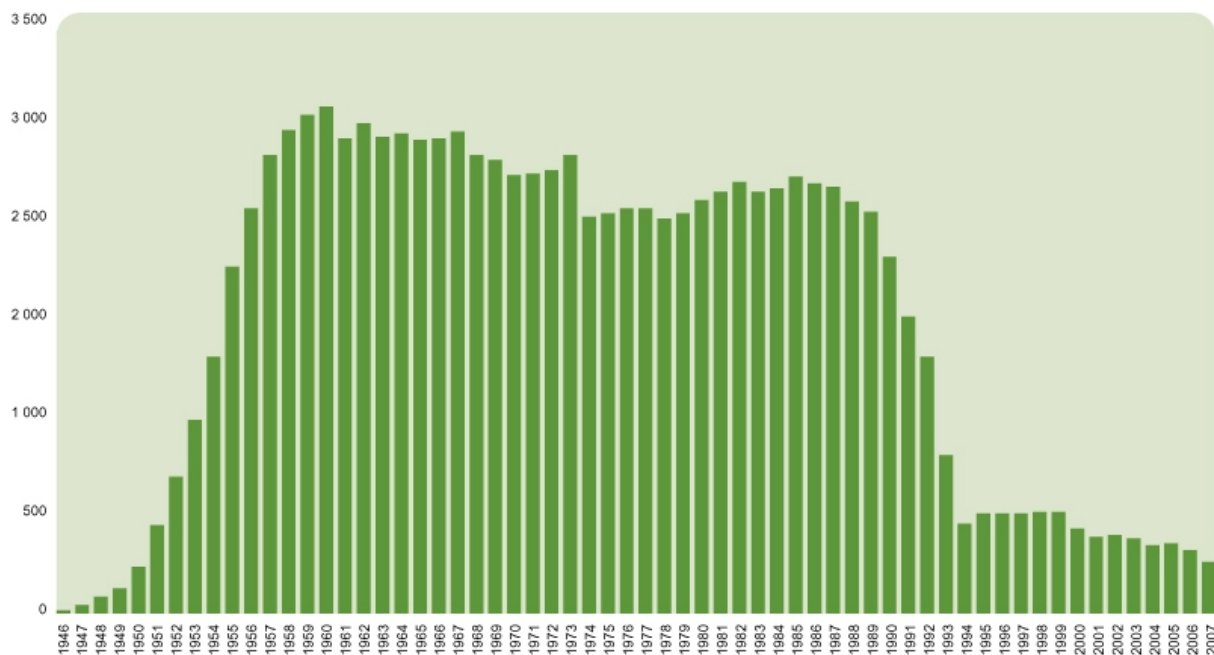
Současně se díky výsledkům vědeckovýzkumných prací a zkušenostech z geologického průzkumu zpřesnila geologická a vyhledávací kritéria. Současně se zdokonalovala metodika vyhledávacích a průzkumných prací. Zvýšila se úroveň hornické a průzkumné činnosti a zdokonalovaly se úpravnické procesy. Dále byla vybudována zařízení na hydrometalurgické zpracování rud. Významnou událostí tohoto období byl objev ložiska u Hamru v severočeské oblasti v první polovině 60. let [1].

Třetí období, od 60. let do poloviny let 80. Toto období bylo významné z hlediska vyhledávání, průzkumu a těžby uranových ložisek, protože docházelo k dalšímu zvýšení vědeckého a metodického řízení a přesunem váhy těžby na hydrogenní ložiska. Zvyšoval se význam ochrany životního prostředí. Od poloviny 60. let byla po experimentálním a laboratorním ověření zaváděna hydrochemická těžba vyluhováním uranových rud v podzemí. Zvyšovaly se technické nároky na vedení dobývacích prací v Příbrami a Rožné, kde se pracovalo ve velkých hloubkách. Neméně důležitým bylo sestavení nových prognózních map na základě map získaných v předešlém období [1].

Čtvrté období, od poloviny 80. let je významné řadou rozsáhlých organizačních změn a to jak v uranovém hornictví, tak i v politické sféře. V letech 1970–1985 se začíná světový trh s uranem vlivem jeho nadprodukce destabilizovat. Od roku 1989 klesly ceny uranu, což mělo za následek, že z celkové vytěženého množství se ho na pohotovém trhu prodalo jen 13–20 %. To vedlo ke snižování ceny uranu a tedy i k uzavírání neefektivních dolů po celém světě. Toto se dotklo i obchodu s československým uranem, jehož vysoká velkoobchodní cena měla za následek omezení až zastavení těžby a konzervaci a likvidaci dolů. Vzhledem k ochraně životního prostředí byly realizovány programy nápravných opatření [1].



Obr. 3: Uranové doly Příbram – šachta č.16 [5].



Graf 1: Produkce uranu (t/rok) v průběhu let na území ČR [6]

2.4 Současný stav těžby

V současnosti je jediným místem, kde dosud trvá těžba uranu, ložisko Rožná v okrese Žďár nad Sázavou. „Usnesení vlády ČR č. 565 ze dne 23. května 2007 k prodloužení těžby uranu na ložisku Rožná v lokalitě Dolní Rožinka umožňuje těžbu a úpravu uranové rudy po dobu ekonomické výhodnosti těžby bez nároku na finanční zdroje státního rozpočtu České republiky“ [6]. Dále probíhají v dotěžené části ložiska likvidační práce a lokalita se postupně sanuje. Jde zejména o důlní díla, odvaly, odkaliště a nevyužitelné stavby [6].

Do 1. dubna 1996 bylo ložisko Stráž exploatováno (využíváno) [29] metodou loužením in situ. Od tohoto data je uran získáván čištěním technologických roztoků a vod v rámci rekultivačních a likvidačních prací s klesajícím trendem do 150 t U na současných cca 30 t ročně [14].

2.5 Vznik a vývoj uranových podniků

Rozvoj uranového hornictví v Československu je úzce spjat s vnitřní situací v Československu a s vývojem mezinárodních vztahů po roce 1945. Tehdy se uran stal strategickou vojenskou surovinou a později strategickým zbožím (jako energetická surovina). V roce 1946 vznikl v rámci znárodnění československých dolů národní podnik Jáchymovské doly Jáchymov [1].

Po vzniku tohoto podniku se postupně rozvíjel geologický průzkum a to jak v jáchymovské oblasti, tak i v celé oblasti západních Čech a Příbrami, dále v jižních Čechách, na Trutnovsku a nejnověji také v oblasti Nového Města na Moravě. V listopadu 1955 byla s ohledem na velké rozšíření průzkumu a těžby na celém území Československa zřízena Ústřední správa výzkumu a těžby radioaktivních surovin (ÚSVTRS) celkem se sedmi národními podniky Jáchymovských dolů. Postupně se název podniku měnil až po současný státní podnik DIAMO se sídlem ve Stráži pod Ralskem [2].

„DIAMO je organizací, která realizuje vládou vyhlášený útlum uranového, rudného a části uhelného hornictví v České republice a zajišťuje produkci uranového koncentráту pro jadernou energetiku“ [6].

V současnosti existují 4 odštěpné závody:

- Těžba a úprava uranu Stráž pod Ralskem (TÚU)
- Správa uranových ložisek Příbram (SUL)
- GEAM Dolní Rožínka
- ODRA Ostrava [6].



Obr. 4: Budova ředitelství DIAMO, s.p. [1].

V souladu se státní politikou postupného zlepšení kvality životního prostředí a odstraňování starých environmentálních zátěží je útlumový a sanační program financován státem a tvoří jej např.:

- Uskutečňování útlumového programu uranového průmyslu. Dále zahlazování následků průzkumu, těžby, úpravy a zpracování ložisek uranu, které bylo zahájeno v roce 1989.
- Dokončení zahlazování následků vzniklých po předchozí těžbě a zpracování rud v rámci útlumu rudného hornictví. To bylo v roce 1990 zahájeno vládou a převzato v roce 2001 po zaniklém státním podniku Rudné doly Příbram [6].

2.6 Uranové minerály

Z geochemického hlediska je základním charakteristickým rysem uranu jeho rozptýlenost v horninách a snadná migrovatelnost. Je vázán převážně jako izomorfní („schopnost různých látek krystalovat ve stejném strukturním typu a tvořit spolu směsné krystaly“) [28] příměs, především v apatitu a zirkonu [8].

Z hlediska chemického je primární uran čtyřmocný, ovšem v supergenních sloučeninách („označení povrchových a mělce podpovrchových pochodů vyvolaných působením atmosférických plynů, zejména však účinky vod a vodních roztoků, sestupujících z povrchu dolů“) [30] figuruje uran šestimocný [8].

Snadná rozpustnost uranylových sloučenin v nejsvrchnějších částech zemské kůry vede ke vzniku velmi pestrého společenstva uranových minerálů. Minerály uranu jsou vždy kyslíkatými sloučeninami. Momentálně převyšuje počet uranových nerostů dvě stovky, to je zhruba pět procent z celkových asi 4000 minerálních druhů [8].

V České republice je známo 112 uranových minerálů (téměř 10 % ze všech známých minerálů v ČR). Nejvíce, celkem 74 minerálních druhů se vyskytuje v oblasti Jáchymova [8]. Příklad ledvinitého agregátu („shluk více krystalových jedinců omezených dotykovými plochami buď zcela nepravidelně, nebo s částečným omezením“) [28] uraninitu viz obr. 5 [7].

Tab. 1: Počet uranových minerálů České republiky [8].

Skupiny	Počet uranových minerálů
Oxidy a hydroxidy	32
Karbonáty	15
Sulfáty	12
Fosfáty, arzenáty, vanadáty	41
Silikáty	12
Celkem	113



Obr. 5: Ledvinitý agregát uraninitu [7].

2.7 Uranová ložiska na území ČR

Tab. 2: Přehled vybraných ložisek a rudných výskytů uranu na území ČR s množstvím likvidovaného kovu větším než 0,1 t U (stav k 31.12.2000) [1].

Pořadí č.	Název ložiska	Období těžby		Množství likvidovaného kovu v t U*	Maximální hloubka zrudnění v m od povrchu
		od	do		
1	Příbram	1950	1991	50 200,8	1450
2	Rožná	1957	dosud	17 240,5	1200
3	Stráž	1967	1996	14 674,1	270
4	Hamr	1972	1993	13 263,8	240
5	Jáchymov	1946	1964	7 950,0	750
6	Zadní Chodov	1952	1992	4 150,7	1250
7	Vítkov II	1961	1990	3 972,6	923
8	Olší	1959	1989	2 922,2	862
9	Horní Slavkov	1948	1962	2 668,3	450
10	Okrouhlá Radouň	1972	1990	1 339,5	650

(*pozn.: jsou započteny i ztráty při dobývání a drobné odpisy zásob v rámci dobývacích bloků)

Jáchymov

Patří mezi nejznámější a současně nejbohatší mineralogické naleziště v ČR. Jedná se sice o ložisko malé, bylo však významné tím, že z něj bylo možné ihned po válce získat uran. Nejprve se zde těžilo stříbro. Na počátku 17. století se město dostalo do hluboké krize, ze které se nevzpamatovalo více než dvě století. Teprve až výroba uranových barev, vzestup ceny uranové rudy – smolince a poté objev rádia zachránili Jáchymovské doly od úplného úpadku [8].

V letech 1926 – 1932 se zde těžilo ročně přibližně 200 t uranové rudy. Od roku 1909 do roku 1945 bylo získáno celkem přes 77 g rádia. V roce 1946 vznikl v Jáchymově národní podnik Jáchymovské doly. Po únoru 1948 zde pracovali především političtí odpůrci režimu. V roce 1957 zde bylo dosaženo největšího objemu těžebních prací, tehdy zde pracovalo několik desítek tisíc zaměstnanců. Od roku 1958 zde již docházelo k postupnému omezování činnosti a vydobytí rudních žil. Od 1.7.1962 byly jednotlivé doly předávány do likvidace [8].

Odhaduje se, že celkově zde bylo v letech 1853-1944 získáno 650 t uraninitu a v letech 1945-1962 bylo na více než 400 rudních žilách vytěženo 7199 t uranu [8].

Současný stav: Odkaliště Eliáš (okres Karlovy Vary) překryto a částečně zalesněno (stará zátěž) [6].

Příbram

Příbramské uranové ložisko je naším největším ložiskem uranu hydrotermálního žilného typu (s produkcí kolem 50 000 t U) a zároveň je jedním z největších ložisek tohoto typu na světě [8].

Vyhledávací práce na uranové rudy zde byly zahájeny v roce 1947. Rychlý rozvoj hornictví vedl k prudkému nárůstu těžby z 12 t U v roce 1950 na téměř 2100 t U v roce 1962. Příbramské ložisko bylo do roku 1975 hlavním producentem našeho uranu. Také příbramskými uranovými doly prošlo v letech 1948 až 1995 kolem 100 000 zaměstnanců. Více než třetinu z tohoto počtu tvořili vězňové. Roku 1971 zde bylo dosaženo největší hloubky rudného dolu v Československu: - 1684m [8].

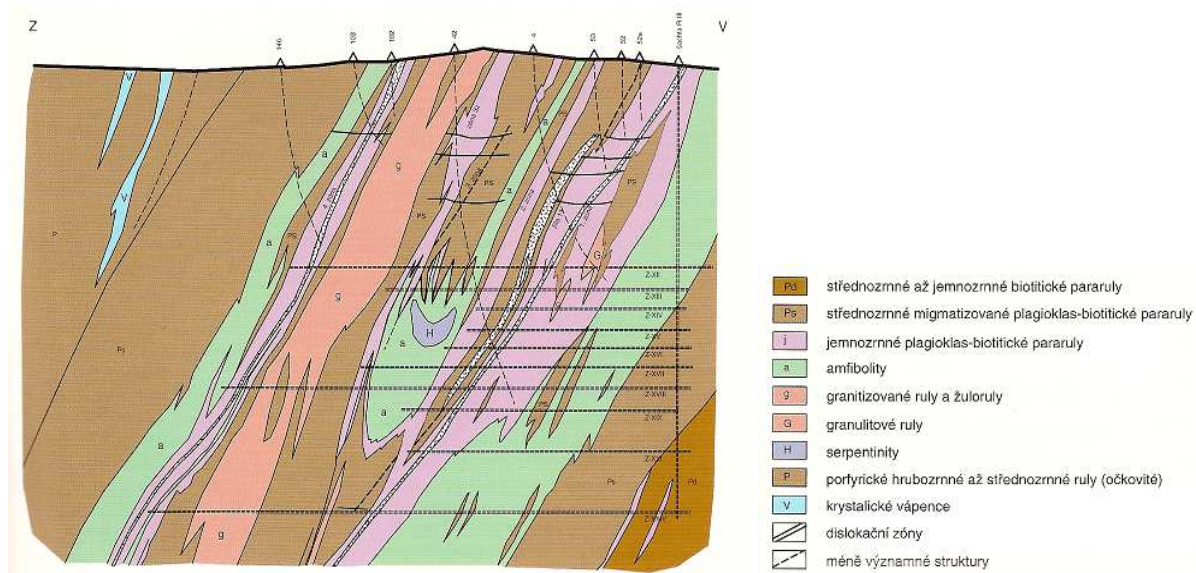
Současný stav: Doly jsou zlikvidovány, podzemí zatopeno, od roku 2005 je v provozu nová čistírna důlních vod u jámy č. 19; vybrané odvaly se zpracovávají na drcené kamenivo a kal je ukládán do odkaliště. Využitelné objekty a areály dolů jsou připraveny k odprodeji nebo postupné likvidaci a asanaci území. Dále je provozováno čištění důlních vod a vod bezejmenné vodoteče [6].

Rožná

Ložisko Rožná (Dolní Rožínka) je součástí rudného pole Rožná-Olší. Je současně největším ložiskem na Moravě a posledním těženým uranovým ložiskem v ČR. Již v hloubce 2–2,5m zde byla objevena uranová mineralizace. V letech 1954 – 1991 zde probíhaly komplexní vyhledávací a průzkumné práce [9].

Samotná těžba byla zahájena v roce 1958. Nyní se hloubka dobývání pohybuje v intervalu 950 až 1100 m pod povrchem a v podzemí je přibližně 580 km důlních chodeb. Dobývací prostor má přibližně 8,76 km². Těžba se zde pohybuje okolo 300 t U za rok [6]. Do roku 2010 zde bylo vytěženo přibližně 19 500 t uranu [32]. Metodami těžby uranu jsou zde: sestupné lávkování na zával pod umělým stropem, výstupkové dobývání se základkou, výběrová metoda z mezipatrových chodeb [6].

Současný stav: Usnesením vlády ČR č. 565 z 23. května 2007 byla těžba na ložisku Rožná prodloužena a bude pokračovat po dobu ekonomické výhodnosti. V dotěžené části ložiska probíhají likvidační práce a postupná sanace lokality (odvaly, odkaliště, důlní díla, nevyužitelné stavby) [6].



Obr. 6: Geologický řez ložiskem Rožná [1].

Hamr na Jezeře

Ložisko bylo objeveno v roce 1964 a tvoří centrální část uranového zrudnění strážského bloku. Uranová ruda dobývacího prostoru Hamr pod Ralskem II byla těžena metodou podzemního vyluhování vrty z povrchů. V roce 1991 bylo vyluhování ukončeno a od roku 1992 jsou zde již prováděny pouze likvidační práce. Dobývání pomocí klasické metody bylo ukončeno roku 1995. Celkem zde bylo vytěženo 13 206 t U, z toho vyluhováním 1251 t U [9].

Současný stav: Podzemí dolu zlikvidováno. Úvodní důlní díla a vydobytý prostor jsou založeny hydrotuhnoucí základkou („horninový materiál, jímž se vyplňují vytěžené důlní prostory“) [30], podzemí se zatápí. Centrální dekontaminační stanice na čištění důlních vod, povrchové objekty dolu, úpravná a další nevyužitelné objekty připraveny k likvidaci. Část objektů úpravný je využívána pro technologii sanace ložiska po chemické těžbě. Odkaliště připravováno pro další využití v rámci sanace ložiska Stráž [6].

Stráž pod Ralskem

Ložisko bylo objeveno v roce 1967 na základě vrtného průzkumu. Těženo bylo od roku 1971 podzemním vyluhováním vrty z povrchu (postupně bylo připraveno do těžby 35 vyluhovacích polí). K zastavení chemické těžby v dobývacím poli Stráž na ploše 24,1 km² došlo v roce 1996. Celkem bylo na ložisku vytěženo 14 674 t uranu [9].

Současný stav: Probíhá likvidace a rekultivace vyluhovacích polí a rozsáhlá sanace zasaženého horninového prostředí s cílem: vyvést uranem obohacené zbytkové technologické roztoky z podzemí a revitalizovat horninové a životní prostředí v oblasti ovlivněné chemickou těžbou [6].

3. Těžba uranové rudy

3.1 Způsob těžby

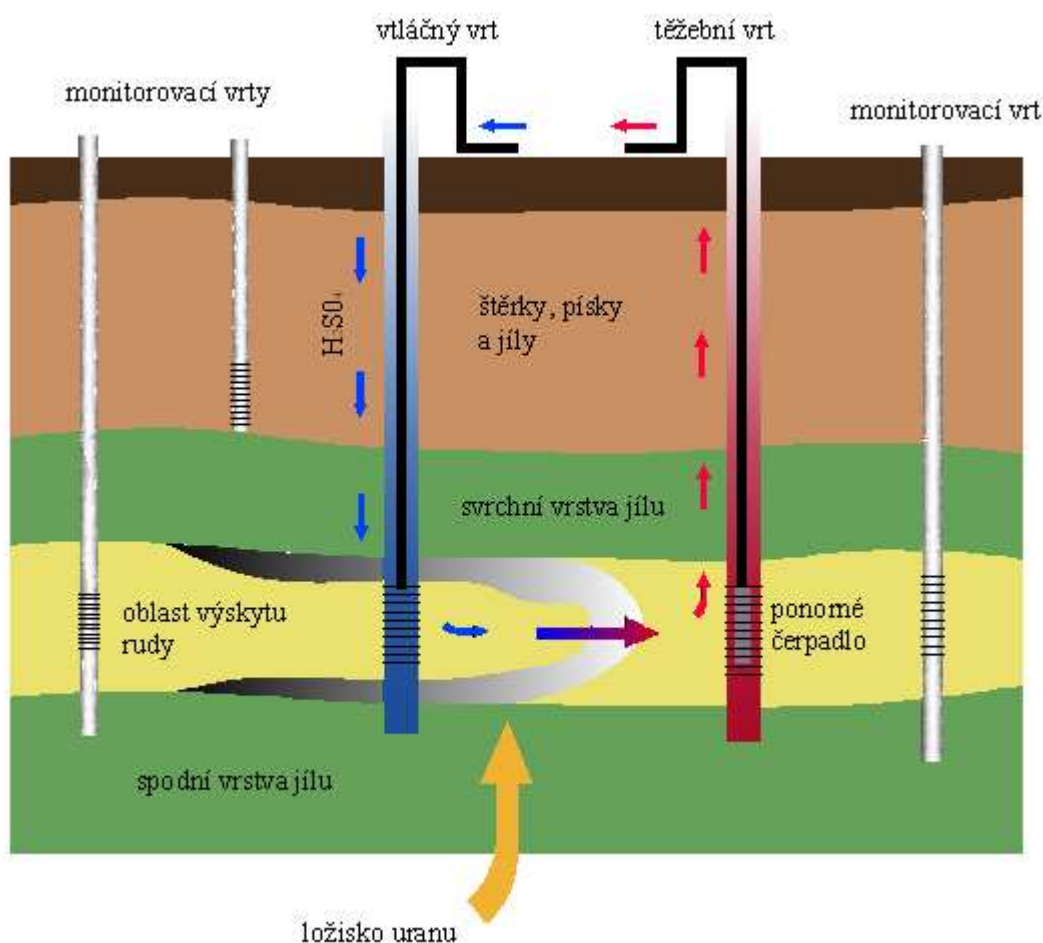
Existují tři způsoby těžby uranové rudy: lomová těžba, podzemní dobývání a těžba chemickým loužením in situ – tzv. metoda ISL (in situ leaching). Do druhé poloviny let šedesátých byl v Československu používán výhradně způsob první. V té době se zkoušela metoda těžby loužením in situ, která v sedmdesátých letech postupně převládla. Důvody byly dva. Jednak byla ložiska se žilným zrudněním již v podstatě vyčerpána a jednak bylo zbývající ložiska obtížné těžít metodou podzemního dobývání [10].

U dobývání všech uranových rud je společným znakem snaha o přísnou selektivitu těžby s nízkým znečištěním a minimálními ztrátami, dále je snaha o úplné vydobytí všech odžilků podle výsledků prováděných radiometrickým měřením [11].

3.2 Těžba chemickým loužením in situ

Jedná se o vysoce účinnou metodu, kterou je možno provádět pomocí různých médií. Ve vyspělých zemích se k tomuto účelu používá alkalický roztok, nebo je možno použít roztok kyseliny sírové. Princip je založen na vtláčení loužícího media vrty do země, kde se přímo na ložisku nasatí uranem a pomocí dalších vrtů je čerpáno na povrch. Po chemickém oddělení uranu se loužící roztok znovu vtláčí do země [10].

V ČSSR začala být zkoušena metoda těžby loužením za pomoci roztoku kyseliny sírové ve druhé polovině šedesátých let na revíru Stráž pod Ralskem, kde současně probíhala i těžba klasickým hornickým způsobem. V oblasti bylo tedy možné vyzkoušet oba dva způsoby těžby, a poté podle technických a ekonomických výsledků rozhodnout ve prospěch efektivnější metody. V roce 1976 bylo ovšem zjištěno nekontrolovatelné pronikání zakyselených vod. Tento problém nadále rostl a v roce 1988 došlo tzv. geologickou poruchou k proniknutí kyselých roztoků a k zakyselení vrchního horizontu turonských (stratigrafický stupeň svrchní křídly, před 92–88 miliony let) [28] pitných vod [10].

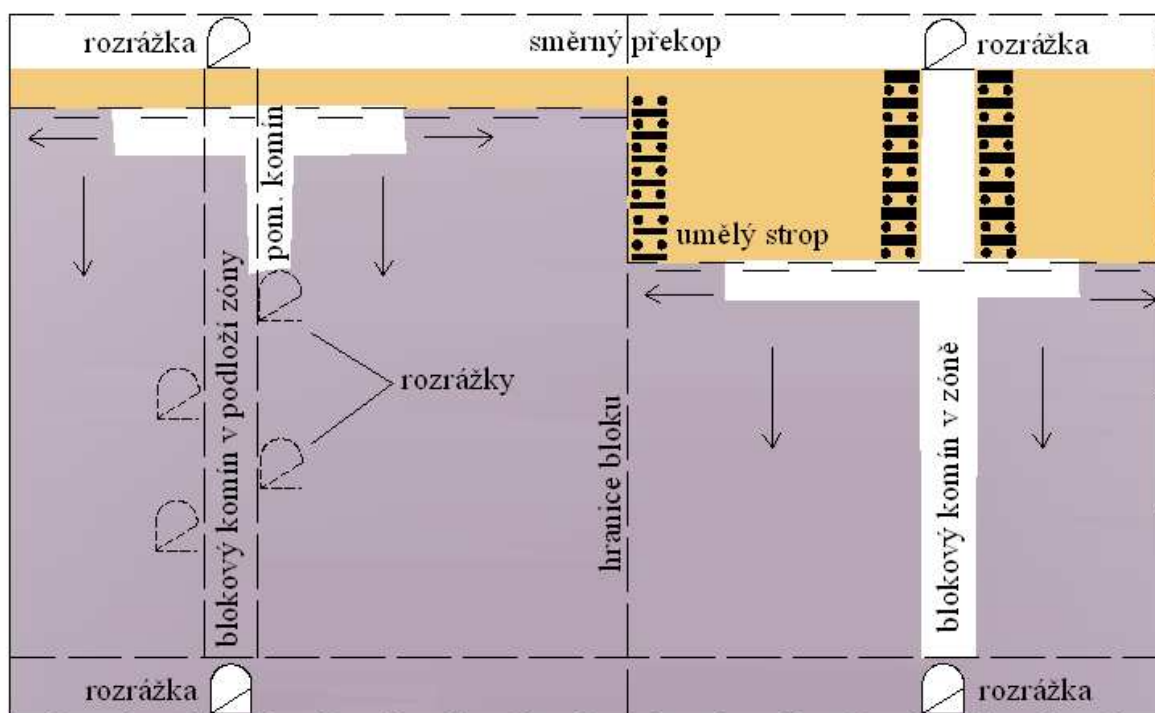


Obr. 7: Schéma podzemního loužení uranu dle [4].

3.3 Metody hlubinného dobývání

V počátcích dobývání, tj. v letech 1956 až 1961 byly na těžných ložiskách Chotěboř, Rožná, Olší a Javorník využívány jen dvě dobývací metody, brzy se však ukázalo, že tyto metody nevyhovují pro bezpečné vydobytí zejména ložiska Rožná. Po krátkém experimentování byla v roce 1964 vyprojektována, úspěšně odzkoušena a do provozu zavedena v tehdejším Československu zcela nová metoda – sestupné lávkování na zával pod umělým stropem [1].

Tato metoda spočívala v sestupném dobývání dobývkového bloku horizontálními lávkami raženými pod sebou a v zaplnění vydobytych prostor závalem nadložních hornin. Výhodou metody bylo zamezení vzniku závalů na dobývkách, její masové zavedení si však vynutilo zvýšenou pozornost na vlivy závalového dobývání na stabilitu nadložního horninového masivu i povrchu [1].



Obr. 8: Sestupné lávkování na zával dle [1].

3.4 Právní předpisy

S těžbou uranu souvisí také přehled právních předpisů vydaných v působnosti ČBÚ platných ke dni 17. ledna 2012, je to zejména zákon č. 44/1988 Sb., o ochraně a využití nerostného bohatství, zvláště pak:

- § 11 Vyhledávání a průzkum výhradních ložisek
- § 14 Klasifikace zásob výhradních ložisek, posuzování a schvalování výpočtu zásob výhradních ložisek
- § 23 Projektování, výstavba a rekonstrukce dolů a lomů
- § 24 Oprávnění k dobývání výhradního ložiska
- § 31 Povinnosti a oprávnění organizace při dobývání výhradních ložisek
- § 32 Plány otvírky, přípravy a dobývání výhradních ložisek a plány zajištění a likvidace hlavních důlních děl a lomů
- § 38 Bezpečnost provozu [22].

3.5. Používané technologie úpravy uranových rud

Úprava nerostných surovin zahrnuje souhrn pracovních operací, jimiž se mění jejich fyzikální vlastnosti, nebo chemické složení, a tak se zvyšuje jejich užitná hodnota. V případě technologie výroby uranu se jedná o složitý mnohooperační proces. Přes rozmanitost technologických postupů je lze obecně rozdělit na několik základních fází [1].

3.5.1 Příprava rudy pro loužení

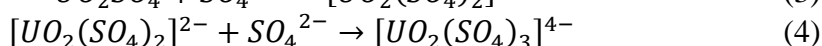
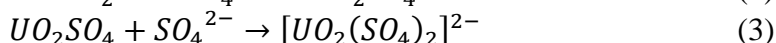
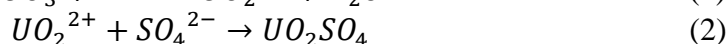
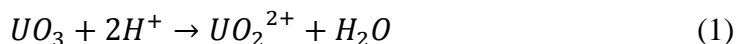
„Účelem technologických operací přípravy rudy pro loužení je provést potřebné rozduřovací procesy a obnažit uranové minerály pro přístup loužicího činidla.“ Rozduřovacími procesy se rozumí „vydělávání užitečných složek upravovaných surovin – těživa do koncentráту“ [1,28].

3.5.2 Vyluhování uranu

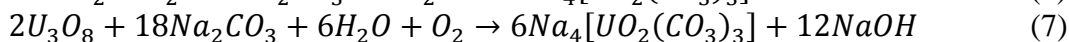
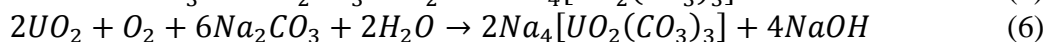
Je nejvýznamnější operací hydrometalurgického procesu, rozhoduje o ekonomii procesu a celkové výtěžnosti. Cílem vyluhování uranových rud a koncentrátů úpravárenských procesů je selektivní (výběrový) [29] rozklad uranových minerálů působením chemických činidel a převedení uranu do roztoku [1].

Použití loužicích činidel se vymezilo na minerální kyseliny (např. H_2SO_4) a karbonáty (např. Na_2CO_3). Oxidace může být prováděna vzdušným kyslíkem, chemickými činidly nebo katalyticky (urychlení chemické reakce katalyzátory). [1, 29]

- Kyselé vyluhování
 - vlastní rozpouštěcí reakce oxidovaného uranu lze vyjádřit následujícími rovnicemi:



- Karbonátové vyluhování
 - chemizmus rozpouštění uranových minerálů můžeme znázornit následujícími rovnicemi: [1]



3.5.3 Separace uranu z výluhů na měničích iontů

Použití měničů iontu bylo v rozvoji technologie uranu jedním z nejdůležitějších řešení. Pomocí iontoměníčů je možné uran selektivně separovat z roztoků (výluhů) nízkých koncentrací a tím jej předat v koncentrovanější formě [1].

„Iontoměniče (ionexy) jsou ve vodě nerozpustné, botnající organické nebo anorganické makromolekulární látky. Mohou obsahovat buď kyselé skupiny schopné vázat kationty (katexy), nebo zásadité skupiny schopné vázat anionty (anexy). Ve styku s roztoky elektrolytů vyměňují své ionty za ekvivalentní množství jiných iontů stejného znaménka z elektrolytu. Ionexy jsou buď přírodní (různé minerály) nebo syntetické. Slouží zejména k úpravě vody“ [28].

3.5.4 Získávání chemických koncentrátů

„Technologický postup pro získání chemického koncentráту předurčuje technologie separace uranu z výluhů, tou je dáno složení výchozího produktu“ [1]. V tuzemských podmínkách to byly:

- karbonátové roztoky uranu z filtrační technologie, z karbonátové rafinace (odstraňování nežádoucích příměsí a nečistot) [29] a eluáty (výluhy) [29] karbonátových sorpcí,
- kyselé roztoky ve formě eluátů kyselé sorpce a rafinovaných eluátů z katexu (ionexu vyměňující kationty) [28] metodou frakčního srážení (část oddělená ze směsi látek vhodnou dělicí metodou) [1, 28].

Nejčastěji byl výsledným produktem chemický koncentrát ve formě diuranátu sodného nebo amonného, případně kysličník uraničito-uranový [1].

Diuranát amonný obsahuje 50–80 % uranu. Po vysušení je to nažloutlá sraženina běžně nazývaná „žlutým koláčem“ [16], ten je v konverzních (přeměňujících) [29] závodech zpracováván na palivo pro jaderné elektrárny [17]. V České republice se toto zpracování neprovádí.



Obr. 9: Diuranát amonný [7].

3.6 Obohacování uranu

Dnes už většina světových jaderných reaktorů nepracuje s přírodním uranem, ale palivo se obohacuje obvykle na 3–4 %. Po technologické, energetické i ekonomické stránce jde o velice náročný proces, jehož účelem je zvýšení obsahu izotopu U_{235} ve směsi U_{235} a U_{238} . Při tom se využívá fyzikálních vlastností hexafluoridu uranu UF_6 . Jedná se o těkavou látku, jejíž skupenství lze v závislosti na tlaku a teplotě snadno měnit. UF_6 se pro účely obohacování převádí do plynného skupenství a poté prochází tzv. obohacovací kaskádou. V té se rozdělují proudy plynu s vyšším a nižším obsahem izotopu U_{235} . Provedení tohoto procesu je možné několika způsoby – např. odstředivací, nebo nově laserovou metodou [18].

4 Těžitelné světové zásoby uranu

4.1 Dělení ložiskových typů

Podle geologické pozice rozlišuje IAEA celkem 15 hlavních kategorií ložiskových typů, z nichž v současnosti největší ekonomický význam mají ložiska pískovcová (Kazachstán, Niger, USA), diskordantní („nesouhlasný – vyjadřuje vztah dvou sousedních horninových jednotek, mezi jejichž uložením nastalo období bez sedimentace nebo období erozní činnosti“) [30] (Kanada), brekciových komplexů („slepence s ostrohrannými úlomky hornin“) [29] (Olympic Dam – Austrálie), vulkanogenní (Krasnokamensk – Ruská federace) a intrusivní (pronikající) [29] (Rössing – Namibie) [14].

Těžené kovnatosti rud se pohybují v širokém rozmezí, přičemž závisí na typu ložiska, způsobu těžby a množství zásob. Průměrné těžené obsahy se ve většině případů pohybují od 0,05 do 0,4 %.

Výjimkou jsou mimořádně bohatá kanadská ložiska diskordantního typu, kde obvyklé, průměrné i několika procentní kovnatosti vzrůstají na některých ložiskách až na 20 % uranu [14].

4.2 Světové zásoby uranu

Zpráva Agentury pro jadernou energii OECD (OECD NEA) a IAEA uvádí, že celosvětové zásoby uranu těžitelné při nákladech do 130 USD/kg uranu činí 5,4 mil. t U (2009). V kategorii ≥ 260 USD/kg uranu pak celkové množství světových zásob vzrůstá na 6,3 mil. t U. Největší část těchto zásob je soustředěna v Austrálii (přes 27 %), Kazachstánu (13 %), Kanadě a Rusku (po 9%), USA (7 %) [14].

Tab. 3: Známé využitelné zásoby uranu (2009) [4].

	t U	podíl ve světě
Austrálie	1,673,000	31%
Kazachstán	651,000	12%
Kanada	485,000	9%
Rusko	480,000	9%
Jihoafrická republika	295,000	5%
Namibie	284,000	5%
Brazílie	279,000	5%
Niger	272,000	5%
USA	207,000	4%
Čína	171,000	3%
celkově (svět)	5,404,000	100%

(pozn.: zahrnuje zásoby do US\$ 130/kg U)

4.3 Světová produkce a potřeba uranu

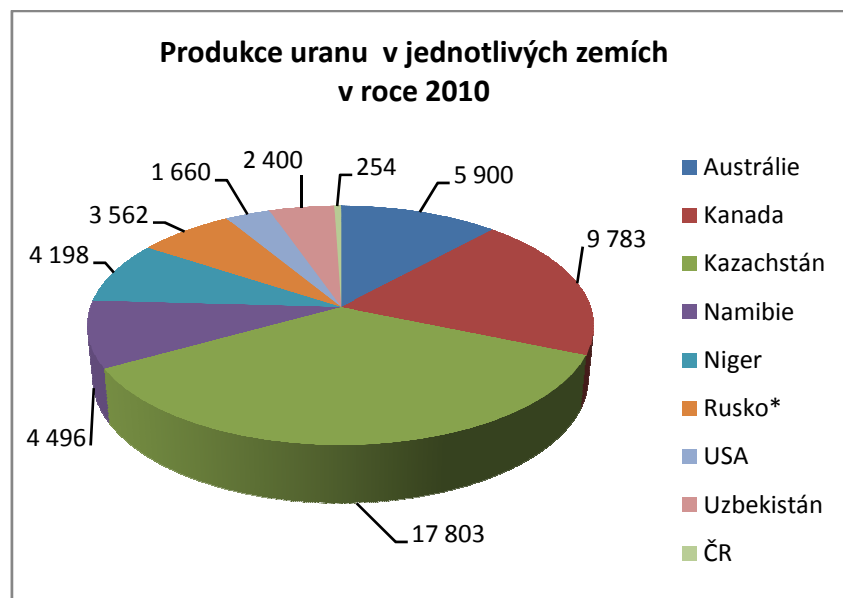
Současná světová roční potřeba uranu pro výrobu paliva jaderných reaktorů se podle WNA pohybuje okolo 68 kt (2012) [4]. Zhruba 78 % potřeb bylo pokrýváno z primárních zdrojů (těžbou), zbylých 22 % potřeb uranu bylo kryto ze sekundárních zdrojů (2010) [4]. V roce 2009, po přechodném meziročním poklesu produkce v roce 2006, došlo k jejímu urychlenému růstu, a to meziročně o 16 %, na čemž se téměř z 80 % podílel Kazachstán. V roce 2010 byla roční produkce téměř 54 kt U. Výrazně rostoucí trend vykazuje i Namibie a Niger [4]. Očekávaná produkce v roce 2011 byla 56,050 t U a předpovídá se další zvýšení produkce až na 63,600 t U v roce 2012 [4, 14].

Z evropských zemí je dlouhodobě stabilní produkce okolo 800-850 t U/rok dosahována na Ukrajině, také v ČR došlo k postupnému poklesu na úroveň 254 t U v roce 2010 [4]. Malé množství je dobýváno v Rumunsku (77 t U v roce 2010). V roce 2010 činil podíl ČR na světové produkci zhruba 0,5 %. Od roku 1945 do roku 2010 bylo ve světě vytěženo zhruba 2,5 mil. t uranu [4]. Velký vzestup těžby nastal v 50. letech, důvodem byly jaderné zbrojní programy a následně i rozvoj jaderné energetiky. Dosavadní rekordní úroveň výroby 45,6 kt U z roku 1990 byla překonána poprvé až v roce 2009 [14].

Tab. 4: Produkce uranu v jednotlivých zemích (akt. duben 2011) [4].

Stát	Produkce v t U				
	2000	2003	2006	2009	2010
Austrálie	7 609	7 572	7 593	7 982	5 900
Kanada	10 590	10 457	9 862	10 173	9 783
Kazachstán	1 740	3 300	5 279	14 020	17 803
Namibie	2 714	2 036	3 077	4 626	4 496
Niger	2 900	3 143	3 434	3 243	4 198
Rusko*	2 500	3 150	3 400	3 564	3 562
USA	1 456	779	1 692	1 453	1 660
Uzbekistán	2 350	1 589	2 270	2 429	2 400
ČR	507	452	359	258	254
celkově (svět)	35 186	35 574	39 444	50 772	53 663
t U ₃ O ₈	-	41 944	46 516	59 875	63 285
% světové poptávky	-	-	63	78	78

(*pozn.: UI/WNA odhad)



Graf 2: Produkce uranu v roce 2010 (akt. duben 2011) [4].

(*pozn.: UI/WNA odhad)

Tab. 5: Světové jaderné reaktory a potřeba uranu (akt. 9.3.2012) [4].

země	vyprodukovaný výkon v jaderných elektrárnách za rok 2010	provoznoschopné reaktory 1 .1. 2012		potřeba uranu 2011
	miliard kWh	počet	MWe net	t U
Čína	71,0	15	11 881	4 079
Francie	410,1	58	63 130	9 254
Indie	20,5	20	4 385	1 305
Japonsko	280,3	51	44 642	2 805
Jižní Korea	141,9	21	18 785	4 029
Rusko	159,4	33	24 164	4 912
Ukrajina	83,95	15	13 168	2 288
Velká Británie	56,9	18	10 745	2 093
USA	807,1	104	101 607	18 376
ČR	26,4	6	3 764	591
svět*	2630	435	372 158	67 990

(*pozn.: přibližná hodnota)

4.4 Druhy těžby

V roce 2010 bylo zhruba 25 % uranu vyprodukováno lomovou těžbou, 28 % pocházelo z podzemní těžby, 41 % bylo získáno loužením in situ a téměř 5 % tvořila doprovodná produkce [4].

Nejdůležitějšími těženými světovými ložisky v roce 2010 byly: McArthur River (Kanada) – 7 654 t U, Ranger (Austrálie) – 3 216 t U, Rössing (Namibie) – 3 077 t U, Krasnokamensk (Rusko) – 2 920 t U, Arlit (Niger) – 2 650 t U, Torkuduk (Kazachstán) – 2 439 t U a Olympic Dam (Austrálie) – 2 330 t U [4].

Tab. 6: Metody používané k těžbě uranu (2010) [4].

metoda	t U	%
podzemní těžba	15 095	28
povrchový důl	13 541	25
in situ (ISL)	22 108	41
doprovodný produkt	2 920	5

(pozn.: zahrnuje těžbu v Olympic Dam do kategorie doprovodný produkt)

Tab. 7: Doly s největší produkcí uranu v roce 2010 (akt. prosinec 2011) [4].

důl	stát	typ těžby	produkce v t U	% světově
McArthur River	Kanada	podzemní	7 654	14
Ranger	Austrálie	povrchová	3 216	6
Rossing	Namibie	povrchová	3 077	6
Krasnokamensk	Rusko	podzemní	2 920	5
Arlit	Niger	povrchová	2 650	5
Tortkuduk	Kazachstán	ISL	2 439	5
Olympic Dam	Austrálie	doprovodný produkt/ podzemní	2 330	4

4.5 Australská těžba

Uranová ruda jako taková byla v Austrálii těžena a zpracovávána od 50. let 20. století do roku 1971. Největšími producenty uranu (žlutého koláče) byli naleziště Radium Hill, Rum Jungle a Mary Kathleen. Poté se produkce zastavila. Druhá vlna průzkumů probíhala koncem 60. let. Díky velkým investičním nákladům, velkých těžebních společností, bylo od 50. do konce 70. let 20. století identifikováno okolo 60 nalezišť uranu. Menší rozmach průzkumů v letech 2002 až 2007 byl řízen menšími společnostmi se záměrem na prokázání lukrativních zdrojů těžby vztahených na současné tržní ceny [4].

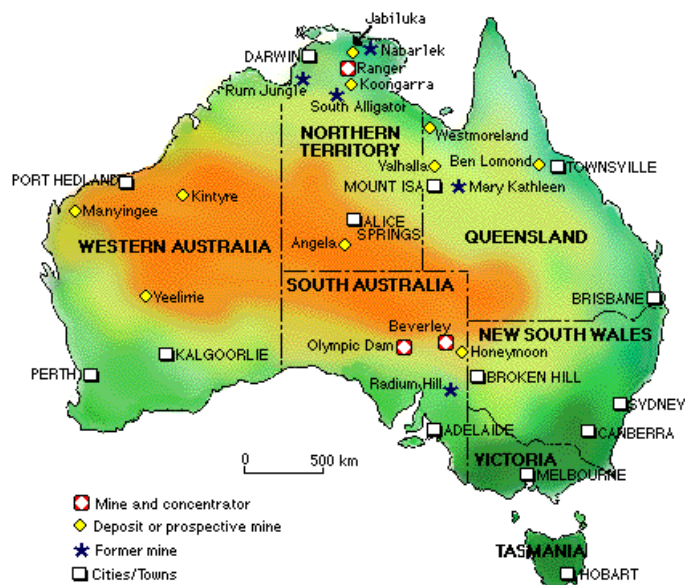
Australský uran je těžen od roku 1954. Momentálně fungují čtyři doly a další jsou plánované. Australské zásoby uranu jsou největší na světě a zaujímají 23 % světových zásob [4].

Australský vývoz se v letech 2007 až 2009 pohyboval okolo 10 000 tun U_3O_8 za rok a v roce 2009 pokryl 15,7 % světového zásobování uranu z dolů. Za rok 2010 však bylo exportováno méně než 7000 tun U_3O_8 . Australský uran je prodáván striktně pouze pro výrobu elektrické energie [4].

Tab. 8: Produkce a vývoz podle kalendářního roku (akt. 29.12.2011) [4].

	2000	2003	2006	2007	2008	2009	2010
produkce (t U_3O_8)	8937	8930	8954	10 145	9941	9413	6957
produkce (t U)	7578	7572	7593	8603	8430	7982	5900
vývoz (t U_3O_8)	8757	9612	8660	10232	9663	9706	6888
vývoz (t U)	7426	8151	7344	8676	8194	8230	5841

V Austrálii jsou v provozu 4 uranové doly, Ranger (Severní teritorium), Olympic Dam, Beverley (Jižní Austrálie) a Honeymoon (Jižní Austrálie), zde byla první produkce v roce 2011. V roce 2012 je očekávaná produkce 275 t U_3O_8 [4].



Obr. 10: Stručná historie australské těžby uranu [4].

Tab. 9: Zásoby uranu na hlavních nalezištích a dolech (t U_3O_8) (akt. 29.12.2011) [4].

důl / ložisko	typ	rezervy	měřené a naznačované zásoby	produkce 2010-2011
Ranger	povrchový důl	16 000	7 000	2 677
Olympic Dam	podzemní těžba	347 500	1 707 000	4 012
Beverley	ISL	-	21 000	347
Honeymoon	ISL	-	2 900	-

(pozn.: zásoby jsou oddělené od rezerv, kromě Olympic Dam, kde jsou zásoby zahrnuty v rezervách)

4.6 Kazašská těžba

Kazachstán je důležitým zdrojem uranu už více jak 50 let. Během let 2001 až 2010 vzrostla roční produkce ze 2000 na 17 803 tun uranu, což z Kazachstánu činí největšího producenta uranu na světě. Současně probíhá další rozvoj těžby s výhledem roční produkce 19 000 t U a teoreticky i 30 000 t U do roku 2018 [4].

Produkce v roce 2011 během 9 měsíců do září byla 13 957 t U. Kapacita je kolem 25 000 t U ročně, nicméně v říjnu roku 2011 Kazatomprom oznámil omezení produkce na 20 000 t U za rok [4].

Kazatomprom je kazašská národní společnost založená v roce 1997 a patřící vládě. Kontroluje veškeré uranové průzkumy a těžbu, stejně jako jiné aktivity spojené s jadernou energií včetně dovozu a vývozu jaderného materiálu [4].

Tab. 10: Kazašská produkce uranu (akt. 8.2.2012) [4].

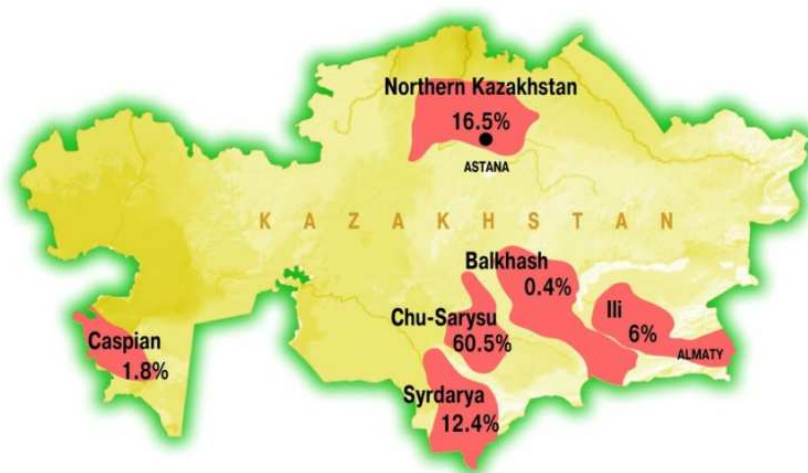
rok	1997	2000	2003	2006	2007	2008	2009	2010	2011
t U	795	1752	2946	5281	6637	8521	14 020	17 803	19 450

Průzkum začal v roce 1948. Ekonomicky výhodná mineralizace byla objevena v několika částech země a podpořila rozmanitou těžbu využívající rudných ložisek. Je známo přibližně 50 nalezišť v šesti uranových provinciích. V roce 1970 bylo úspěšně zahájeno testování těžbou loužením [4].

Do roku 2000 bylo z rudných ložisek těženo dvojnásobné množství uranu než metodou loužením, ale dnes pochází téměř všechna produkce z těžby metodou ISL [4].

Tab. 11: Kazašské zásoby uranu (akt. 8.2.2012) [4].

provincie	zásoby (t U)
severní (Stepnoye) skupina	750 000
severní	256 000
západní skupina	180 000
východní (Tsentrálne) skupina	140 000
Ily	96 000
jižní (Zarechnoye) skupina	70 000
Prikaspyi / Caspian	24 000
Balkhash	6 000



Obr. 11: Šest uranových provincií s ložisky uranu [15].

4.7 Nigerská těžba

Uran byl v Nigeru objeven v oblasti Azelik v roce 1957 při hledání ložisek mědi. První komerční uranový důl byl spuštěn do provozu v roce 1971. V současnosti se v Nigeru nachází 2 významné doly poskytující 7,5 % světové produkce uranové rudy. Jedná se o těžbu na dole Arlit a Akouta. Niger se se svojí roční produkcí 4 198 t U v roce 2010 umístil na pátém místě ve světě v množství vyprodukovaného uranu a jen těsně zaostal za Namibií. Na konci roku 2006 překročilo množství produkce 100 000 t U, z čehož asi 56 % pocházelo z podzemní těžby a 44 % z povrchových dolů [4].

Těžba na dole Arlit spadá pod společnost Somair, ta byla založena v roce 1968 a samotná těžba pak začala v roce 1971. Celková produkce uranu za rok 2010 činila 2650 t. Celkově bylo vytěženo více než 44 000 t U [4].

Dalšími významnými nalezišti jsou Akouta a Akola patřící pod společnost Cominak, založenou v roce 1974. Jedná se o podzemní těžbu v hloubce okolo 250 metrů. V roce 2009 byla roční produkce 1 435 t uranu. Celková produkce v rámci Cominak překročila hranici 55 000 t U [4].

Tab. 12: Nigerské zásoby uranu [4] (konec roku 2009).

naleziště	zásoby (t U)	
	prokázané	předpokládané
Arlit	15 200	7 971
Akouta	8 460	16 210

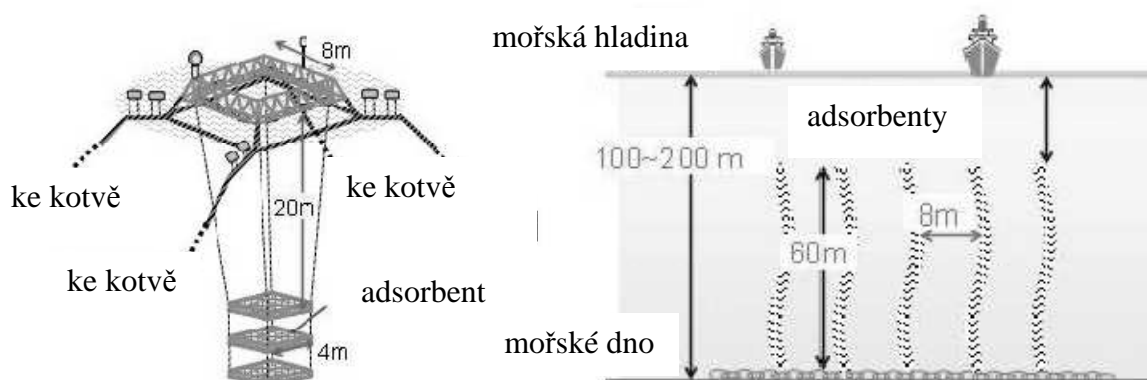
V Nigeru má těžba uranu velké politické zastoupení a je snaha o její další rozšiřování. Příkladem jsou naleziště Abokorum, Azelik, či Madaouela, či bohaté naleziště Imouraren, o které mají zájem především společnosti z asijských zemí [4].

4.8 Mořské zásoby uranu

V mořské vodě se vyskytuje obrovské množství rozpuštěného uranu, přibližně 4,5 miliardy tun, což je asi 1000 krát více, než se vyskytuje na pevnině. Vzhledem k neustálému rozvoji jaderné energetiky, a s ním rostoucí potřebě po uranu, by mohl uran z mořské vody sloužit jako dostatečný zdroj zásob pro výrobu paliva. Ve skutečnosti je však koncentrace uranu v mořské vodě pouze 3 ppb (to odpovídá 3 µg uranu na 1 kg mořské vody) [34, 35]. Při tak malé koncentraci uranu je potřeba najít dostatečně vhodný adsorbent s extrémní schopností selektivity (výběrovosti) [29,34].

Vývoj takového typu adsorbentu byl předmětem výzkumu již v 60. letech. V roce 1964 byl prvním výsledkem vývoje adsorbent na bázi oxidu titanu. Jeho první experimentální využití bylo v Japonsku v letech 1981 až 1988. Ukázalo se však, že tento způsob je ekonomicky značně nevýhodný. Bylo tedy třeba najít jiný typ adsorbentu. Na počátku 80. let byl vyvinut adsorbent na bázi polymerových vláken. Tyto typy adsorbentů jsou vyráběny synteticky a mají mnohem větší adsorpční schopnost než adsorbenty na bázi oxidu titanu [34, 36].

Ukázalo se, že určité části konstrukce potřebné pro tento způsob získávání uranu navyšovaly celkovou cenu až o 40 %. Jednalo se především o plovoucí konstrukci na hladině a adsorbční lože umístěné ve vodě. Z tohoto důvodu byly vyvinuty speciální adsorbenty uchycené na dně moře pomocí kotev a pohybující se ve vodě podobně jako mořské řasy [34].



Obr. 12: Způsoby adsorbce uranu z mořské vody [34].

5. Dopady těžby uranu na životní prostředí

Těžba člověka ovlivňuje a mění životní prostředí a přírodní zdroje. Dnes je posuzování vlivů hornické činnosti na životní prostředí dáno zákonem. Posuzovány jsou vlivy a důsledky těžby jak na obyvatelstvo, tak na životní prostředí (vliv na živočichy, rostliny, půdu, vodu, ovzduší, aj.). Posuzování vlivů na životní prostředí je povinnou součástí přípravy, provozování i ukončení těžby [1].

5.1 Zdroje zatížení životního prostředí těžbou uranu:

- haldy – odvaly hlušiny a kaly (kalojemy, odkaliště = usazovací nádrže)
- loužení in situ
- skládky průmyslových a komunálních odpadů
- větrací šachty při i po ukončení těžby
- změny v reliéfu terénu, narušení inženýrských sítí a komunikací, aj. [13]



Obr. 13: Povrchový důl na těžbu uranu [20].

5.2 Dopady v ČR

V souladu se státní politikou postupného zlepšení kvality životního prostředí a se závazky České republiky vůči Evropské unii, rozhodla ČR o podpoře, společném postupu a finanční účasti státu na zahlazování následků vyhledávání, těžby a zpracování uranu a rud. Toto se týká i tzv. starých zátěží z těžby v minulosti [1].

Momentálně je pozornost soustředěna na sanaci a rekultivaci průmyslových areálů, tedy na místa, kde se těžila a zpracovávala uranová ruda. Ke snížení ekologických zátěží slouží čistící stanice důlních a úpravárenských vod [12].

5.2.1 Uranové doly Příbram

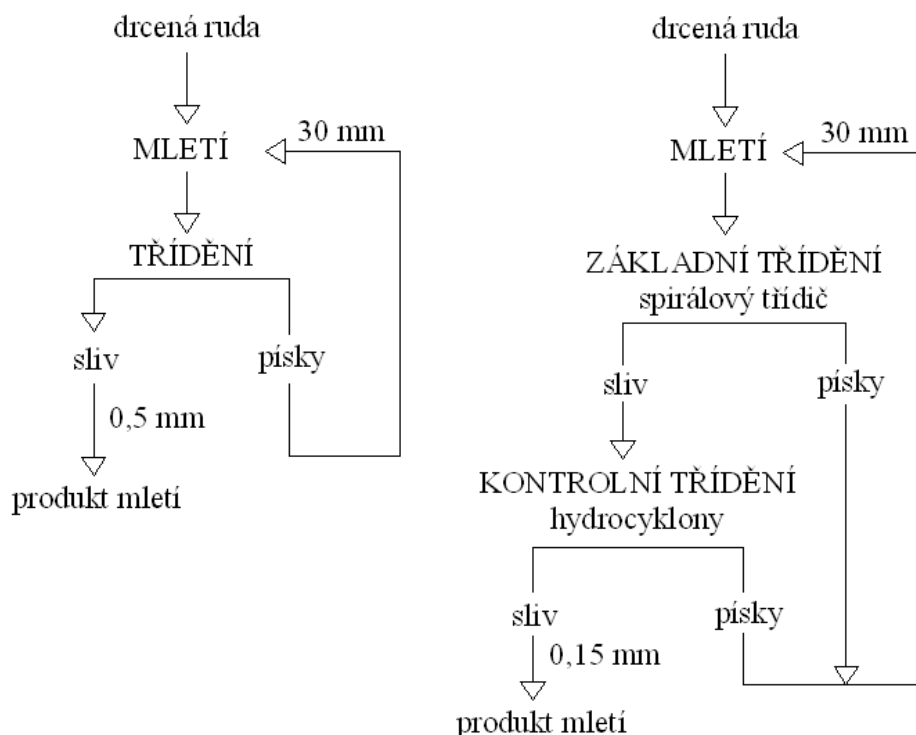
V současnosti je na Příbramsku 14 odvalů, na kterých je uloženo celkem 1 622 500 m³ hlušiny. Ta obsahuje zbytkové množství nuklidů, včetně těžkých kovů a dalších radionuklidů. Zábor takovéto plochy působí nepříznivě na krajinu. Chybějící vegetační kryt způsobuje vlivem sluneční radiace rychlé ohřátí povrchu haldy, to má za následek vznik stoupavých vzdušných proudů. Tyto mají vliv na místní klimatické podmínky [13].

Povrch haldy je zdrojem emisí radioaktivního prachu a radonu. V případě intenzivních dešťů dochází k vodní erozi, radioaktivní bahno je zanášeno do okolí, kde způsobuje znečištění a kontaminaci půdy, povrchových a podzemních vod [13].

5.2.2 CHÚ uranu MAPE Mydlovary

Celkově zde bylo v letech 1962 až 1991, kdy zde probíhalo zpracování uranových rud, zpracováno celkem 16 745 835 tun uranové rudy. Z této rudy bylo vyrobeno celkem 28 525 tun uranového koncentráту, tzv. žlutého koláče. Uran byl z rud získáván tzv. kyselým loužením pomocí kyseliny sírové a alkalickým ložením pomocí Na₂CO₃. Celkově bylo do odkališť uloženo 36 milionů tun kalů s obsahem 0,0138 % U. To je přibližně 2 320 tun uranu [13].

Dnes je v úložištích až 26 metrů vysoká vrstva radioaktivních sedimentů. Okolí odkališť je kontaminováno uschlým sedimentem. Zvedne-li se vítr, je tento prach unášen do značných vzdáleností. Půda v přilehlých obcích má zvýšený obsah těžkých kovů a zvýšenou radioaktivitu [13].



Obr. 14: Technologická schémata hrubého (vlevo) a jemného (vpravo) jednostupňového mletí v CHÚ MAPE Mydlovary dle [1].

5.3 Sanace ložiska Stráž

„Na základě usnesení vlády ČR č. 244/95 byl zpracován návrh koncepce sanace ložiska Stráž po chemické těžbě“ [19]. Její významnou částí je Stanice pro likvidaci kyselých roztoků (SLKR I), jejíž stavba byla uskutečněna v rámci projektu „Likvidace roztoků podzemní těžby uranu – I. etapa“. Projekt sestával ze tří hlavních částí – „odpařování“, „krystalizace a rekrystalizace“ a „reverzní elektrodialýzy“ (EDR) [19].

5.3.1 Odpařování

Tento proces zahrnuje vlastní tepelné zahušťování roztoku po separaci uranu s vyváděním destilátu, a poté následuje úprava koncentrovaného roztoku [19].

Vstupním roztokem pro **tepelné zpracování** je roztok I. Ten je z obou částí spodní jímky cirkulován dvěma čerpadly do horního prostoru nad výměníkem. Odtud je roztok distribuován pomocí rozdělovače na vnitřní stěnu každé z vertikálních trubek výměníku. Poté roztok stéká zpět do příslušné části spodní jímky. Malá část roztoku se vypaří. Vzniklá pára prochází zařízením na odlučování kapek, poté je nasávána do parního kompresoru, zde se mírně komprimuje a ohřeje na teplotu 138 °C. Poté je zavedena do vnější plášťové strany trubek tepelného výměníku odparky, kde předá své teplo chladnějšímu roztoku, který stéká po vnitřní straně trubek. Takto pára zkondenzuje. Následuje odtok vzniklého destilátu z odparky samospádem do zásobníku destilátu, odkud je odčerpáván do deskových výměníků tepla. Kvůli odstranění dusitanů je ještě do horkého destilátu dávkována v nezbytně nutném množství kyselina amidosírová. Nekondenzující plyny jsou odváděny ze zásobníku destilátu do kondenzátoru a po odloučení většiny obsažené páry do spalovny NO_x [19].

Koncentrovaný roztok z odparek lze zpracovávat několika způsoby:

- bez vyvádění kamence
- s vyváděním surového kamence
- s vyváděním rekrystalovaného kamence [19].

Kamence jsou dodekahydráty podvojných solí, nejznámějším zástupcem je kamenec draselno–hlinitý [33].

Aby došlo k odstranění přítomných nerozpustných látek, prochází roztok z odparek po zpracování, před jeho načerpáním do vyluhovacích polí, přes usazovací nádrž [19].

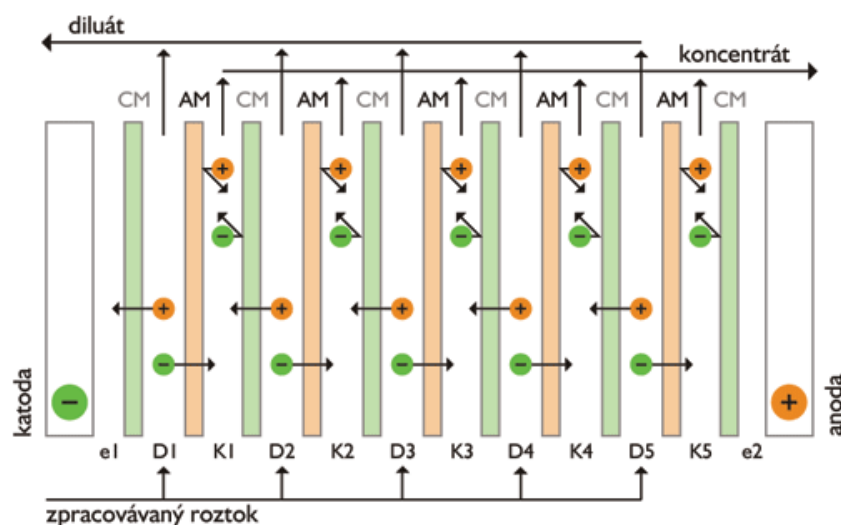
5.3.2 Elektrodialýza (ED)

Je to proces, při kterém dochází k separaci záporně nabitých částic od kladně nabitých podle jejich migrace k příslušným elektrodám. K řízení této migrace slouží iontoměničové membrány, kterými je transportován jen určitý druh iontů, podle jejich náboje [24].

Princip elektrodialýzy spočívá v působení stejnosměrného elektrického pole na pohyb disociovaných (rozložených) [29] složek solí ve vodném roztoku tak, že kationty které se pohybují ke katodě jsou propouštěny katexovými membránami a zadržovány anexovými membránami. Naopak anionty, které jsou přitahovány k anodě jsou propouštěny anexovými membránami a zadržovány na katexových membránách. K dělení iontů ve vstupním roztoku dochází vhodnou kombinací katexových a anexových membrán a vytváří se proud odsolený, tzv. diluát a proud koncentrovaný, tzv. koncentrát [24].

Provoz elektrodialýzy se skládá ze tří základních částí:

- systému předúpravy
- systému elektrodialýzy
- systému doupravy [19].



Obr. 15: Elektrodialýza – schéma separačního procesu [24].

(pozn. CM – katexová membrána, D – diluátová komora, e1,e2 – elektrodové komory, AM – anexová membrána, K – koncentrátová komora)

5.4 Jednotlivé etapy sanace ložiska Stráž

S ohledem na časovou, ekonomickou a technickou náročnost sanace (odčerpávání roztoků a jejich odsolení na povrchu) je celý proces rozdělen do pěti etap, které na sebe navazují. Tímto postupem je možno verifikovat (ověřovat správnost) [29] jednotlivých kroků a korigovat postup v následující etapě. Cílem je dosáhnout ekologického a ekonomického optima [25].

První etapu (2000–2004) je možno charakterizovat jako období, kdy se bude postupně zvyšovat vyvádění solí z ložiska v souladu s realizací výstavby technologií SLKR II na přepracování kamence [25].

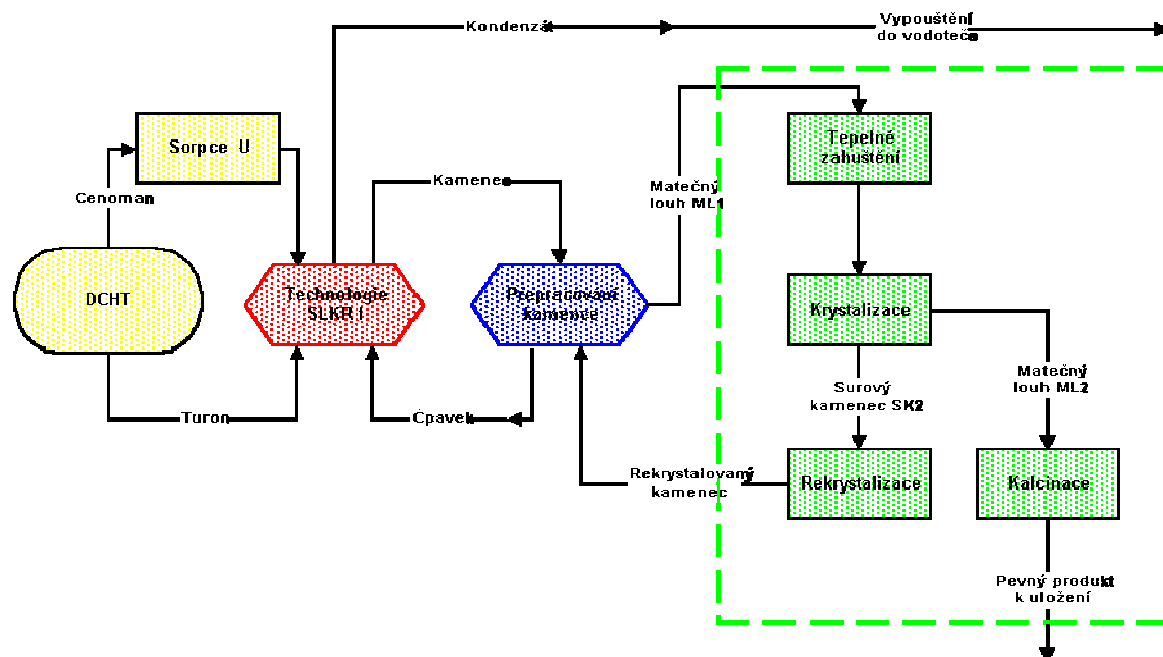
Druhá etapa (2005–2010) je charakterizována plným provozem technologických jednotek na přepracování kamence (cca 200 000 t/rok). V této etapě je cílem vyvést maximální množství kamence z roztoků. Dále je toto období charakterizováno postupnou realizací výstavby technologických jednotek na přepracování matečných louhů ML1 a ML2 a rekonstrukcí technologie NDS [25].

„Matečný louh je tok odpadní vody, přímo vznikající ze syntézy nebo chemické reakce, obecně s velkou koncentrací produktu, výchozích složek nebo vedlejších produktů, zvláště počáteční vodné fáze“ [31].

Třetí etapa (2011–2021) zajišťuje plné vyvádění solí. V této etapě již nebudou žádné látky, obsažené v kyselých roztocích vstupujících na odparku vtlačeny zpět do podzemí. Dále bude přepracován matečný louh ML2 na materiál vhodný k uložení na stávajícím odkališti Stráž [25].

Čtvrtá etapa (2022–2032) je charakterizována nasazením membránových technologií (MT) pro zpracování cenomanských roztoků (nejstarší stupeň svrchní křídy, před 96–92 miliony let) [25, 28].

Pátá etapa je období od dosažení předběžného cílového parametru (pokles koncentrace roztoků na dostatečně nízkou úroveň), do dosažení definitivního. Nejprve bude postup podobný jako v posledních letech čtvrté etapy. Po roce 2035 bude s poklesem koncentrace čerpaných roztoků poměrně rychle klesat produkce kamence [25].



Obr. 16: Blokové schéma technologií v roce 2010 [25].

5.5 Nakládání s odpady v ČR

„Odpovědnost za bezpečné ukládání radioaktivních odpadů v ČR převzal na základě tzv. atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb.) stát“ [17]. O činnosti související s danou problematikou (zajištění bezpečného ukládání radioaktivních odpadů v souladu s požadavky na ochranu člověka i životního prostředí) se stará Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) [17].

V ČR je roční produkce radioaktivního odpadu na jednoho obyvatele 4 kg (celková produkce radioaktivního odpadu na celém světě je 81 000 m3). [27] Radioaktivní odpady se dělí z hlediska míry jejich aktivity/nebezpečnosti na:

- nízko aktivní odpady NAO
- středně aktivní odpady SAO
- vysoce aktivní odpady VAO [27].

Největší část radioaktivních odpadů z provozu českých jaderných elektráren tvoří odpady nízko a středně aktivní. Ty jsou ukládány v úložišti radioaktivních odpadů v areálu Jaderné elektrárny Dukovany, jejíž kapacita je dostatečná pro provoz obou českých jaderných elektráren na celou dobu jejich životnosti [17].

Pro uložení vysoce aktivních odpadů a použitého jaderného paliva se momentálně hledají dvě vhodné lokality, které by měly být vybrány do roku 2015 a zprovozněny do roku 2065. Do té doby se o vysoce radioaktivní odpad a použité jaderné palivo musejí starat jejich původci [17].

5.6 Dopady v Austrálii

Přestože Austrálie nevyrábí elektrickou energii z energie jaderné, její použití radioizotopů v medicíně, výzkumu a průmyslu je na velmi dobré úrovni [4].

Každý rok vyprodukuje Austrálie okolo 45 m³ radioaktivního odpadu pocházející z těchto použití a z výroby izotopů – z toho okolo 40 m³ tvoří nízko aktivní odpad (NAO) [27] a 5 m³ středně aktivní odpad (SAO) [27]. Tento odpad je nyní skladován na více než 100 místech po celé Austrálii [4].

5.7 Australské plány

Veškerý radioaktivní odpad, který to vyžaduje, bude stabilizován a ponechán ztuhnout. Pouze ten, který bude v pevné, stabilní formě a zcela bez koroze a reaktivních materiálů bude přijat do skladiště nebo zásobárny. Ostatní toxický odpad bude buď poslán do likvidačních areálů, nebo bude uchováván ve skladu. S radioaktivním odpadem je nakládáno mnohem opatrněji než s jiným toxickým odpadem vzhledem k nebezpečí ohrožení člověka a přírody. Mnoho z těchto ostatních toxických odpadů se nerozloží přirozeným způsobem, který odpovídá postupnému rozpadu radioaktivity [4].

Nízko aktivní odpad bude zlikvidován ve speciálním skladišti navrženém tak, aby bylo zaručeno, že je radioaktivní materiál zapečetěn a je umožněn jeho bezpečný rozpad. Suché podmínky umožní jednodušší konstrukci než některé skladiště v zámoří. Materiál bude spálen v sudech, nebo zapečetěn betonem. Skladiště bude mít pevně uzavřený mnohavrstvý obal minimálně 5 metrů tlustý, tak aby nemohlo dojít k průniku radioaktivity do okolního prostředí [4].



Obr. 17: Barely s radioaktivním odpadem s nízkou úrovní radioaktivity [26].

6. Využití uranu v budoucnu

6.1 Urychlovačem řízený transmutor

Urychlovačem řízený transmutor se vyznačuje tím, že jeho jediným zdrojem neutronů není jen štěpení, ale obsahuje také další zdroj neutronů. Samotný reaktor pak může být podkritický, štěpná řetězová reakce nemůže probíhat samostatně, ale musí v něm být udržována právě pomocí vnějšího zdroje neutronů, který je jejich hlavním dodavatelem. Zdrojem neutronů jsou v tomto případě tříštivé reakce s velmi vysokou energií s těžkými jádry v tlustém terči [21].

O využití urychlovačem řízeného transmutoru se poprvé uvažovalo ve čtyřicátých letech, kdy se tak měl řešit nedostatek štěpného materiálu pro výrobu jaderných zbraní v USA. Ke znovuoobjevení zájmu o tyto systémy došlo v devadesátých letech [21].

Urychlovačem řízený transmutor se skládá ze tří základních částí – protonového urychlovače, terče z těžkého materiálu, na které dopadají urychlované protony a reaktoru, který obklopuje terč [21].

To, jestli bude transmutor zaměřen na produkci energie, produkci štěpného materiálu (paliva pro klasické reaktory), příp. na transmutaci dlouhodobých radioizotopů z jaderného odpadu, bude určovat konkrétní konfiguraci paliva, jaderného odpadu, případně moderátoru i dalších komponent [21].

Pro nalezení nejlepších variant urychlovačem řízených transmutačních systémů je potřeba provést řadu dalších studií. Především je pak důležitá práce nad počítačovými programy, které dokáží velmi přesně popsat produkci neutronů během tříštivé reakce a dále transport těchto neutronů různými materiály. Mimo to jsou schopny popsat průběh velkého množství transmutačních systémů [21].



Obr. 18: Lineární protonový urychlovač v laboratoři BNL v Brookhavenu [21].

6.2 Reaktory IV. generace

Úkolem nové generace reaktorů je umožnit ještě intenzivnější využití jaderné energetiky a také zajistit ekologickým způsobem dostatek energie. Tomu se podřizují požadavky na ně. Ty se vztahují jak na samotný reaktor, tak i na zařízení pro transformaci tepelné energie na elektrickou. Dále se vztahují na všechny podpůrné provozy, např. pro recyklaci vyhořelého paliva. Bezpečnost jaderného reaktoru a celé jaderné energetiky je prioritou [21].

Neméně důležitým kritériem je ekonomika provozu jaderných elektráren, včetně její konkurenceschopnosti s ostatními zdroji energie. Sem patří také možná doba provozování jaderného reaktoru a životnost. Zvýšením doby provozování automaticky roste ekonomická výhodnost [21].

Mezinárodní fórum pro generaci IV představilo v roce 2002 návrh šesti základních konceptů nových reaktorů, které podle jejich představ naplňují požadavky na budoucí rozvoj jaderné energetiky [21].

6.2.1 Reaktory s velmi vysokou teplotou (VHTR) [23]

Jedná se o reaktory pracující s moderovanými neutrony („látko, která účinně zpomaluje neutrony a současně je výrazně nepohlcuje“) [28]. Pro moderaci se plánuje využívání uhlíku. Jako chladivo by sloužilo helium. Reaktor by pracoval při velmi vysokých teplotách okolo 1000 °C, což by umožnilo jeho využití k produkci vodíku i pomocí termochemických metod. Znamená to ovšem také radikální skok v nárocích na kvalitu použitých materiálů [21].

Do roku 2010 měla být stanovena základní koncepce projektu reaktoru. V roce 2015 by měla být dokončena optimalizace systému a jeho vlastností. Jedná se o typ reaktorů generace IV, který by mohl být k dispozici již před rokem 2030 [21].

6.2.2 Reaktory využívající vodu v superkritické fázi (SCWR) [23]

Opět se jedná o klasické reaktory s moderovanými neutrony. Zde se jako moderátor i chladicí medium používá voda v superkritické fázi. Jedná se v podstatě o lehkovodní reaktor chlazený a moderovaný vodou za vysokého tlaku a teploty. Hodnoty teploty a tlaku překračují současně ve fázovém diagramu hodnoty pro superkritický bod.

V takovém případě je tekutina ve stavu jedné fáze a má částečně vlastnosti jak kapaliny, tak i plynu. Vyšší efektivita konverze (přeměny) [29] tepelné energie je výhodou právě využití vysoké teploty chladicího média. Využitím vody v superkritickém stavu se v daném případě zvýší účinnost elektrárny z 33 % na 45 %. Jako palivo by se používal oxid uranu. Cílem tohoto reaktoru by měla být především levná a efektivní výroba jaderné energie [21].



Obr. 19: Elektrárna Enrico Fermi v USA, jejíž třetí blok je varný lehkovodní reaktor [21].

6.2.3 Reaktory založené na roztavených solích (MSR) [23]

Tento reaktor může v principu pracovat jak jako klasický, tak i rychlý reaktor. V tomto případě by jako palivo i chladivo sloužily roztavené soli. Tak jako v případě sodíku by nebylo potřeba mít vysoký tlak i pro vysoké teploty chladiva. Reaktor by pracoval i při teplotách potřebných pro produkci vodíku. Palivo by bylo obsaženo v solích ve formě UF_4 nebo ThF_4 , příp. by bylo rozprostřeno v grafitové matici, ta by zároveň sloužila jako moderátor [21].

Ze všech reaktorů generace IV jde pravděpodobně o nejnáročnější typ. Ačkoliv slibuje řadu výhod, cesta k jeho funkčnímu ekonomickému modelu bude ještě dlouhá a náročná [21].

Velké zkušenosti s chemií roztavených solí jsou právě v Česku v Ústavu jaderného výzkumu a.s. v Řeži [21].

6.2.4 Rychlé reaktory chlazené plynem (GFR) [23]

U tohoto typu by byla pracovní teplota zhruba $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, což by umožnilo efektivní produkci vodíku a jako palivo by se používalo helium. Palivem by mohl být uran, ale efektivně by se spalovaly i transurany z vyhořelého jaderného paliva [21].

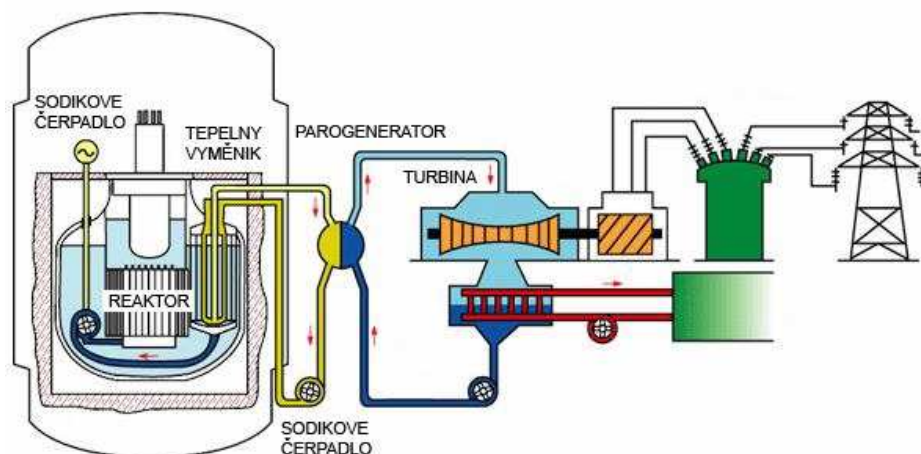
V případě funkce v množivém režimu (množivé reaktory využívají ke štěpení neutrony bez toho, aby je moderovaly) [21] by byla část paliva v podobě ochuzeného uranu. Pro zajištění co nejefektivnějšího spalování by mělo být palivo v podobě kuliček nebo hranolů a to nejlépe v keramické podobě. Aby se co nejvíce snížil objem radioizotopů posílaných do konečného uložení, oddělovali by se uran a transurany k dalšímu využití [21].

6.2.5 Sodíkem chlazené rychlé reaktory (SFR) [23]

V tomto případě se jedná o rychlé reaktory, kdy se jako chladivo bude využívat tekutý sodík. Pracovní teplota by se měla pohybovat kolem $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rychlé energetické reaktory, které v současnosti fungují, jsou právě tohoto typu, je s nimi tedy bohatá zkušenost. Díky spektru rychlých neutronů by byla v množivém režimu možná efektivní produkce paliva z U_{238} i velmi efektivní spalování, jak plutonia, tak i ostatních transuranů. Uvažují se dvě varianty. Větší zařízení s výkonem 500 až 1500 MWe a menší s výkonem 150 až 600 MWe.

V obou případech se uvažuje o různé formě přepracování paliva přímo v areálu elektrárny [21].

Co se týče rychlých reaktorů, měl by být k dispozici nejdříve, možná i před rokem 2030. Při konstrukci sodíkem chlazených rychlých reaktorů je možné vycházet ze zkušeností s reaktorem BN-600 (obr. 20) [21].



Obr. 20: Reaktor BN-600 který pracuje v Bělojarské jaderné elektrárně (schéma) [21].

6.2.6 Olovem chlazené rychlé reaktory (LFR) [23]

Také s olovem chlazenými reaktory jsou již dlouholeté zkušenosti, spolehlivě fungují například na ruských ponorkách. Jako chlazení se plánuje využívat olovo, nebo eutektická směs olova a bismutu, její výhodou je snížení teploty tavení, nevýhodou je, že rozpadem beta se produkuje radioaktivní izotop Po_{210} . Ten je nebezpečným alfa zářičem. Pracovní teplota by se měla stejně jako u SFR pohybovat okolo $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, nicméně při použití speciálních materiálů pro konstrukci chladicího okruhu by mohla být pracovní teplota až $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vyšší teplota by umožnila termochemickou produkci vodíku pro vodíkové hospodářství. Palivo by bylo buď ve formě nitridů uranu a plutonia, nebo v kovové formě [21].

Plánuje se vývoj středně velkých reaktorů s elektrickým výkonem 600MWe, ale i malého kompaktního mobilního reaktoru s výkonem 10 až 100MWe, jež by disponoval velmi dlouhým intervalem mezi výměnou paliva (15 až 20 let) [21].

7. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo zhodnotit současný stav těžby a zásob uranu. Z výsledků je zřejmé, že v současnosti se největší množství zásob vyskytuje na území Austrálie a tvoří jej téměř jedna třetina všech světových zásob. Dalšími důležitými státy s velkými zásobami uranu jsou Kazachstán, Kanada a Rusko. V otázce samotné produkce se situace ve světě za posledních 10 let značně změnila. Zatím co ještě v roce 2000 byly hlavními producenty uranu Kanada a Austrálie, v současné době získávají na důležitosti také rozvojové země jako jsou Namibie a Niger, především pak ale Kazachstán, jehož produkce za 11 let prudce vzrostla a to více než 11 krát a v roce 2010 pokryla necelou třetinu celkové světové produkce. Ta v daném roce zahrnovala asi 75 % světové poptávky.

V otázce samotné těžby se v současnosti nejvíce využívá metody loužení in situ, na druhém místě je pak klasická podzemní těžba, za níž jen těsně zaostává těžba povrchovými doly. Nejproduktivnějším dolem v roce 2010 byl důl McArthur River v Kanadě, jež tvořil 14 % světové produkce. Dále to byly doly Ranger v Austrálii a Rossing v Namibii. Je zajímavé sledovat, že ačkoliv je v současnosti nejvíce používanou metodou těžby uranu právě metoda podzemního loužení, u nejvýznamnějších světových dolů se tento způsob těžby nepoužívá. Co se týče potřeby uranu, jsou na prvním místě jednoznačně Spojené státy americké a Francie, které spolu v roce 2011 tvořili zhruba 40 % světové potřeby uranu.

Na závěr bych se chtěl zmínit o stavu těžby na území ČR. Ta byla vždy široce spjata především s politickou situací v dané době. S těžbou uranu se začalo po druhé světové válce a její největší rozmach byl v 60. až 80. letech, kdy byla roční produkce kolem 2500 až 3000 t uranu za rok. Po roce 1989 pak došlo k prudkému poklesu těžby především vlivem snížení cen uranu. Za celou dobu historie těžby bylo nejvýznamnějším ložiskem ložisko Příbram, kde bylo za celý, více než čtyřicetiletý provoz, vytěženo přes 50 000 t uranu. Dnes už se těží pouze na ložisku Rožná okolo 300 t uranu ročně. Malé množství se získává čištěním důlních vod v oblasti Stráž pod Ralskem. Jak dlouho bude ještě těžba na ložisku Rožná probíhat, bude záviset především na ekonomické výhodnosti těžby.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Ac U	izotop uranu U_{235}
AM	anexová membrána
amu	unifikovaná atomová hmotnostní konstanta
BNL	Brookhaven National Laboratory (Brookhavenská národní laboratoř)
CHÚ	chemická úprava
CM	katexová membrána
ČBÚ	Český báňský úřad
D	diluátová komora
DCHT	důl chemické těžby
e	elektrodová komora
ED	elektrodialýza
EDR	reverzní elektrodialýza
GFR	Gas–Cooled Fast Reactors (Rychlé reaktory chlazené plynem)
IAEA	International Atomic Energy Agency (Mezinárodní agentura pro atomovou energii)
ISL	in situ leaching (metoda in situ)
K	koncentrátová komora
LFR	Lead–Cooled Fast Reactors (Olovem chlazené rychlé reaktory)
ML	matečný louh
MSR	Molten Salt Reactors (Reaktory založené na roztavených solích)
MT	membránové technologie
NAO	nízko aktivní odpad
NDS	neutralizační a dekontaminační stanice
NEA	Nuclear Energy Agency (Agentura pro jadernou energii)
OECD	Organisation for Economic Co–operation and Development (Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj)
OKD	Ostravsko–karvinské doly
ppb	parts per bilion (hmotnost složky v μg na 1 kg soustavy)
RD	rudné doly
SAO	středně aktivní odpad
SCWR	Supercritical–Water–Cooled Reactors (Reaktory využívající vodu v superkritické fázi)
SFR	Sodium–Cooled Fast Reactors (Sodíkem chlazené rychlé reaktory)
SK	surový kamenec
SLKR	stanice pro likvidaci kyselých roztoků
s.p.	státní podnik
s.r.o.	společnost s ručením omezeným
SUL	Správa uranových ložisek Příbram
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
t U	tuna uranu
TÚU	Těžba a úprava uranu Stráž pod Ralskem
U I	izotop uranu U_{238}
U II	izotop uranu U_{234}
UI	Uranium Institute (Uranový institut)
ÚSVTRS	Ústřední správa výzkumu a těžby radioaktivních surovin
VAO	vysoce aktivní odpad
VHTR	Very–High–Temperature Reactors (Reaktory s velmi vysokou teplotou)
WNA	World Nuclear Association (Světová jaderná asociace)

Seznam použité literatury

- [1] *Rudné a uranové hornictví České republiky*. Ostrava: Anagram, 2003. ISBN 80–86331–67–9.
- [2] RYTÍŘ, L. *60 let těžby a výroby uranu* [online]. c.2007, [cit. 2012–2–1]. <<http://proatom.luksoft.cz/view.php?cisloclanku=2006061901>>.
- [3] GORIN, C. *Extraction of Uranium from Seawater* [online]. 2010–11–30, poslední úpravy 30.11.2010 [cit. 2012–1–23]. <<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/gorin2/>>.
- [4] *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2012–1–18]. <<http://www.world-nuclear.org/infomap.aspx>>.
- [5] *Historie bývalých Uranových dolů Příbram* [online]. c2008, [cit. 2012–1–15]. <<http://www.zdarbuh.cz/reviry/ud-pribram/historie-byvalych-uranovych-dolu-pribram/>>.
- [6] *O společnosti* [online]. c2012, [cit. 2012–1–16]. <<http://www.diamo.cz/uranove-rudy>>.
- [7] *Institut geologického inženýrství* [online]. [cit. 2012–1–23]. <<http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/>>.
- [8] PAULIŠ, P. – KOPECKÝ, S. – ČERNÝ, P. *Uranové minerály České republiky a jejich naleziště: 1. část*. 1. vydání. Kutná Hora: Kuttna, 2007. ISBN 80–86406–45–8.
- [9] PAULIŠ, P. – KOPECKÝ, S. – ČERNÝ, P. *Uranové minerály České republiky a jejich naleziště: 2. část*. 1. vydání. Kutná Hora: Kuttna, 2007. ISBN 80–86406–45–8.
- [10] TOMEK, P. *Československý uran 1945 – 1989: těžba a prodej československého uranu v éře komunismu* [online]. [2008?], [cit. 2012–2–2]. <<http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/police/udv/sesity/sesit1/sesit1.doc>>.
- [11] GRYGÁREK, J. *Hlubinné dobývání rudných, nerudných a uranových ložisek*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, [1979?], dotisk 1997. 157 s. ISBN 80–7078–258–7.
- [12] LEPKA, F. *Český uran: neznámé hospodářské a politické souvislosti 1945 – 2002*. 1. vydání. Liberec: Knihy 555, 2003. 104 s. ISBN 80–8660–06–0
- [13] BERNARD, M., et al. *Uran: bude se u nás znovu těžit?*. České Budějovice: Calla, 2008. ISBN 978–80–903910–5–5.
- [14] *Surovinové zdroje České republiky: nerostné suroviny*. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 1993–. 2010. ISSN 1801–6693.
- [15] ImagineWebSolutions. *Uranium Deposits* [online]. c2005, [cit. 2012–1–28]. <http://www.kazatomprom.kz/en/pages/uranium_deposits>.

-
- [16] *Historie, těžba, zpracování, vývoz, hospodářské a politické souvislosti českého uranu* [online]. [cit. 2012–1–25]. <http://hgf2.unas.cz/sem_prac_uran.htm>.
- [17] DUFKOVÁ, M. *Základní informace pro účastníky jedenáctého setkání Klubu Svět energie: uranové doly Dolní Rožínka* [online]. 2010–10–1, [cit. 2012–2–5]. <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/program_11._setkani_kse.doc>.
- [18] BÁTĚK, D. *Paliva jaderných reaktorů a palivový cyklus*. Brno: Vysoké učení technické. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav, 2010. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Hugo Šen.
- [19] JOSEFI, R. – ŠRÝTR, Z. *Sanace ložiska Stráž* [online]. poslední úpravy 12.5.2005 [cit. 2012–1–17]. <<http://slon.diamo.cz/hpvt/2001/sekce/sanace/23/S23.htm>>.
- [20] Paomedia. *How is Uranium Mined and Processed?* [online]. [cit. 2012–1–22]. <http://keeptheban.org/?page_id=744>.
- [21] PAZDERA, J. *Objective Source E-Learning* [online]. 2010–11–30, [cit. 2012–1–19]. <<http://www.osel.cz/index.php>>.
- [22] *Státní báňská správa ČR: právní předpisy – přehled platných* [online]. c2005, poslední úpravy 24.2.2012 [cit. 2012–2–29]. <<http://www.cbusbs.cz/prehled-platnych.aspx>>.
- [23] *Nuclear Power Education* [online]. c2012, last revision 27th of July 2010 [cit. 2012–1–15]. <<http://nuclearinfo.net/Nuclearpower/TheScienceOfNuclearPower>>.
- [24] Qartin. *Membránové procesy – elektrodialýza* [online]. c2006, [cit. 2012–1–24]. <<http://www.mega.cz/elektrodialyza.html>>.
- [25] BENEŠ, V. *Sanace ložiska Stráž – II.etapa* [online]. poslední úpravy 12.5.2005 [cit. 2012–1–17]. <<http://slon.diamo.cz/hpvt/2001/sekce/sanace/24/S24.htm>>.
- [26] *Radioactive waste management* [online]. c2004, [cit. 2012–1–27]. <<http://theenergylibrary.com/node/11965>>.
- [27] DOČKAL, M. *Odpady a recyklace: přednáška č. 18 – radioaktivní odpad* [online]. [cit. 2012–2–15]. <http://storm.fsv.cvut.cz/on_line/odrz/18.pdf>.
- [28] Optimus. *CoJeCo – Vaše encyklopedie* [online]. c1999, [cit. 2012–2–10]. <<http://www.cojeco.cz/index.php>>.
- [29] KUČERA, R. *ABZ.cz: slovník cizích slov* [online]. c2005, [cit. 2012–2–12]. <<http://slovník-cizich-slov.abz.cz/>>.
- [30] *Česká geologická služba: Úvodní stránka* [online]. [cit. 2012–2–15]. <<http://www.geology.cz/extranet>>.
- [31] CENIA, *česká informační agentura životního prostředí* [online]. [cit. 2012–2–10]. <http://www.cenia.cz/_C12571B20041F1F4.nsf/index.html>.
-

- [32] Česká geologická služba *GEOFOND* [online]. c2012, [cit. 2012–4–6].
<<http://www.geofond.cz/cz/domu>>.
- [33] MUSILOVÁ, E. – CÍDLOVÁ, H. *Chemické názvosloví anorganických sloučenin* [online]. [cit. 2012–5–1]. <<http://is.muni.cz/do/1499/el/estud/pdf/ps09/slouceniny/web/pages/324.html>>.
- [34] TAMADA, M. *Current status of technology for collection of uranium form seawater* [online]. [cit. 2012–5–2]. <http://www.physics.harvard.edu/~wilson/energypmp/2009_Tamada.pdf>.
- [35] *Chemické výpočty* [online]. [cit. 2012–5–2]. <http://www.physics.harvard.edu/~wilson/energypmp/2009_Tamada.pdf>.
- [36] HOFMANN, Z. *Uran* [online]. [cit. 2012–5–2]. <www.hofmann.estranky.cz/file/236/uran-ve-svete.doc>.

Seznam obrázků

Obr. 1 Uraninit v kalcitové žilné výplni [1].....	13
Obr. 2 Úložiště odstředivek v Evropě [4]	14
Obr. 3 Uranové doly Příbram – šachta č. 16 [5]	15
Obr. 4 Budova ředitelství DIAMO, s.p. [1]	17
Obr. 5 Ledvinový agregát uraninitu [7].....	18
Obr. 6 Geologický řez ložiskem Rožná [1]	20
Obr. 7 Schéma podzemního loužení uranu dle [4]	22
Obr. 8 Sestupné lávkování na zával dle [1]	23
Obr. 9 Diuranát amonný [7].....	25
Obr. 10 Stručná historie australské těžby uranu [4].....	30
Obr. 11 Šest uranových provincií s ložisky uranu [15]	31
Obr. 12 Způsoby adsorpce uranu z mořské vody [34].....	33
Obr. 13 Povrchový důl na těžbu uranu [20].....	33
Obr. 14 Technologická schémata hrubého (vlevo) a jemného (vpravo) jednostupňového mletí v CHÚ MAPE Mydlovary dle [1]	35
Obr. 15 Elektrodiálýza – schéma separačního procesu [24].....	36
Obr. 16 Blokové schéma technologií v roce 2010 [25]	38
Obr. 17 Barely s radioaktivním odpadem s nízkou úrovní radioaktivity [26]	39
Obr. 18 Lineární protonový urychlovač v laboratoři BNL v Brookhavenu [21].....	40
Obr. 19 Elektrárna Enrico Fermi v USA, jejíž třetí blok je varný lehkovodní reaktor [21]	42
Obr. 20 Reaktor BN-600 který pracuje v Bělojarské jaderné elektrárně (schéma) [21].....	43

Seznam tabulek

Tab. 1 Počet uranových minerálů České republiky [8]	18
Tab. 2 Přehled vybraných ložisek a rudných výskytů uranu na území ČR s množstvím likvidovaného kovu větším než 0,1 t U (stav k 31.12.2000) [1].....	18
Tab. 3 Známé využitelné zásoby uranu (2009) [4].....	26
Tab. 4 Produkce uranu v jednotlivých zemích (akt. duben 2011) [4]	27
Tab. 5 Světové jaderné reaktory a potřeba uranu (akt. 9.3.2012) [4]	28
Tab. 6 Metody používané k těžbě uranu (2010) [4].....	29
Tab. 7 Doly s největší produkcí uranu v roce 2010 (akt. prosinec 2011) [4]	29
Tab. 8 Produkce a vývoz podle kalendářního roku (akt. 29.12. 2011) [4]	29
Tab. 9 Zásoby uranu na hlavních nalezištích a dolech (t U_3O_8) (akt. prosinec 2011) [4].....	30
Tab. 10 Kazašská produkce uranu (akt. 8.2.2012) [4].....	30
Tab. 11 Kazašské zásoby uranu (akt. 8.2. 2012) [4].....	31
Tab. 12 Nigerské zásoby uranu (konec roku 2009) [4]	32

Seznam grafů

Graf 1 Produkce uranu (t/rok) v průběhu let na území ČR [6]	16
Graf 2 Produkce uranu v roce 2010 (akt. duben 2011) [4]	28